

Vysoká škola báňská – Technická univerzita
Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra slévárenství

D i s e r t a č n í p r á c e

2010

Ing. Martina Homolová
Dubová

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra slévárenství

**Obsah plynů v litině a jejich vliv
na kvalitu tekutého kovu**

Disertační práce

Studijní program: Metalurgie (P2106)

Studijní obor: Metalurgická technologie (2109V036)

Školitel : Doc. Ing. Vladimír Vondrák, CSc. (do roku 2006)

Prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.

Doktorand : Ing. Martina Homolová Dubová

Ostrava 2010

ANOTACE

Cílem předložené disertační práce bylo analyzovat provedená měření, zhodnotit vliv sledovaných faktorů na obsah kyslíku a dusíku, a objasnit termodynamické pochody probíhající při tavení a mimopecním zpracování litiny, s ohledem na výskyt endogenních bublin způsobených přítomností výše uvedených plynů v tekutém kovu a to při tavení v elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecích a bubnových rotačních plynových pecích.

Teoretická část práce je zaměřena zejména na popis obecných zákonitostí interakce plynů v roztaveném kovu, charakteristice v metalurgii nejčastěji se vyskytujících plynů – tj. vodíku, dusíku a kyslíku a představení slévárenských vad, které tyto plyny mohou způsobovat. Součástí teoretického rozboru je také nástin základního principu tavení ve výše jmenovaných tavících zařízeních, včetně popisu významných chemických reakcí probíhajících při tavení a mimopecním zpracování litiny.

Experimentální část práce nejprve popisuje zvolenou metodiku měření a vyhodnocování získaných dat. Výsledky jednotlivých měření jsou zpracovány z hlediska průběhu tavení v jednotlivých výrobních zařízeních, obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku v tekutém kovu při tavení a mimopecním zpracování litiny a výskytu endogenních bublin. Součástí této kapitoly je také statistické testování rozdílu obsahu kyslíku a dusíku s ostatními sledovanými parametry.

V závěru práce jsou porovnány získané výsledky měření s výsledky publikovanými v odborné literatuře věnující se problematice obsahu plynů, zejména obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku v tekutém kovu, s využitím získaných informací pro praxi.

ANNOTATION

The objective of this dissertation thesis was to analyze the measurements, to evaluate the influence of controlled factors on the content of oxygen and nitrogen, and elucidate the thermodynamic processes during the smelting and cast-iron processing out of the furnace, with regard to the presence of endogenous bubbles caused by the presence of the gases in liquid metal mentioned above during the melting process in mid-frequency electric induction furnaces and rotary drum-type gas furnaces.

The theoretical part is mainly focused on describing the general patterns of interaction of gases in molten metal, characteristics of the most frequently occurring gases in the metallurgical – i.e. hydrogen, nitrogen and oxygen, and the presentation of foundry defects, which can be caused by these gases. The part of the theoretical analysis is an outline of the basic principle of melting in the above-mentioned melting facilities, including a description of important chemical reactions ongoing in the smelting process and cast-iron processing out of the furnace.

The experimental part of the thesis describes the methodology of measurement and evaluation of obtained data. The results of measurements are processed in terms of smelting process in the particular process equipment, the total oxygen content in the form of oxides and nitrogen in liquid metal during the

smelting and cast-iron processing out of the furnace, and presence of endogenous bubbles. Part of this chapter is also a statistical test of the difference of oxygen and nitrogen content with the other endpoint.

At the end of the work, obtained results are compared with the measurement results published in the scientific literature related to the issue of content of gases, especially the total oxygen content in the form of oxides and nitrogen in liquid metal, using gathered information for practice.

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Cíl práce	2
	<i>Teoretická část</i>	
3.	Plyny v železe a jeho slitinách	3
3.1	Pohlcování plynů kovem	3
3.2	Rozpustnost plynů v kovu	5
3.3	Vylučování plynů z tekutého kovu	8
3.4	Vodík	10
3.5	Dusík	12
3.6	Kyslík	14
3.6.1	Úloha kyslíku v metalurgii	15
3.6.1.1	Kyslík při výrobě oceli	15
	Ing. Martina Homolová Dubová Ostrava, 2010	5

3.6.1.2	Kyslík při výrobě litiny	16
3.7	Plynové vady odlitků	19
3.7.1	Bubliny	19
3.7.2	Bodliny	20
3.7.3	Odvařeniny	21
3.7.4	Staženiny	21
4.	Tavení litin	22
4.1	Elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece	23
4.2	Plynové rotační bubnové pece	24
4.3	Chemické a termodynamické podmínky tavení	25
4.3.1	Reakce mezi železem a kyslíkem	26
4.3.2	Reakce mezi uhlíkem a kyslíkem	26
4.3.3.	Reakce mezi uhlíkem a hořčíkem	26
4.3.4	Reakce mezi křemíkem a kyslíkem	26
4.3.5	Reakce mezi křemíkem a uhlíkem	27
4.3.6	Reakce mezi hliníkem a kyslíkem	28
4.3.7	Reakce mezi vápníkem a kyslíkem	29
4.3.8	Reakce mezi hořčíkem a kyslíkem	29
4.3.9	Reakce mezi cerem a kyslíkem	30
4.3.10	Reakce mezi stronciem a kyslíkem	30
4.3.11	Reakce mezi bariem a kyslíkem	31

4.4.	Fyzikální podmínky tavení	32
4.4.1	Teplotní podmínky	32
4.4.2	Tlakové podmínky	34
4.4.3	Časové podmínky	35
5.	Dezoxidace litin	37
5.1	Dezoxidace litin v průběhu tavení	37
5.2	Dezoxidace litin mimopecním zpracováním	38
 Experimentální část		
6.	Metodika měření	41
7.	Dosažené výsledky	44
7.1	Naměřené obsahy celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku v jednotlivých slévárenských provozech	45
7.1.1	Charakteristika sléváren využívající technologii elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí	46
7.1.2	Charakteristika sléváren využívající technologii bubnových rotačních plynových pecí	53
7.1.3	Diskuse naměřených hodnot obsahu kyslíku ve formě oxidů a dusíku	54

7.2	Teplotní, tlakový a časový průběh tavení a jeho vliv na obsah celkového kyslíku ve formě oxidů	55
7.2.1	Měření v laboratorních podmínkách	55
7.2.2	Měření ve slévárenských provozech využívající technologii elektrických indukčních kelímkových středofrekvenčních pecí	56
7.2.3	Měření ve slévárenských provozech využívající technologii bubnových rotačních plynových pecí	60
7.3	Výskyt slévárenských vad	62
7.3.1	Výskyt endogenních bublin u taveb v elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecích.....	62
7.3.2	Výskyt endogenních bublin u taveb v bubnových rotačních plynových pecích	62
8.	Statistické testování významnosti rozdílů mezi sledovanými parametry a obsahem plynů v tekutém kovu	63
8.1	Vliv sledovaných parametrů na obsah plynů u elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí	66
8.1.1	Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox	67
8.1.1.1	Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při tavení	67
8.1.1.2	Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox	

při mimopecním zpracování	75
8.1.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku	80
8.1.2.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při tavení	80
8.1.2.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při mimopecním zpracování	88
8.1.3 Výsledky statistického zpracování pro technologii elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí	92
8.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah plynů u bubnových rotačních plynových pecí	93
8.2.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox	95
8.2.1.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při tavení	96
8.2.1.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při mimopecním zpracování	101
8.2.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku	103
8.2.2.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při tavení	103
8.2.2.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku	

při mimopecním zpracování	110
8.2.3 Výsledky statistického zpracování pro technologii	
bubnových rotačních plynových pecí	113
8.3 Vliv druhu materiálu na obsah plynů	115
8.3.1 Technologie elektrických indukčních	
středofrekvenčních kelímkových pecí	115
8.3.2 Technologie bubnových rotačních plynových pecí	117
8.4 Porovnání elektrických indukčních středofrekvenčních	
kelímkových pecí a bubnových rotačních plynových pecí	119
8.4.1 Obsah Oox a dusíku při tavení	119
8.4.2 Obsah Oox a dusíku při mimopecním zpracování	120
8.5 Vliv obsahu Oox na obsah dusíku	122
9. Závěr	124
Seznam použité literatury	
Seznam vlastních prací	
Přílohy	

Seznam zkratk

a.....	aktivita
a, q.....	konstanty
Al _{MAX}	maximální obsah hliníku
Al _{MIN}	minimální obsah hliníku
ANOVA.....	analýza rozptylu
BRPP.....	bubnová rotační plynová pec
C.....	konstanta závisající na povaze plynu a kovu
ČSN.....	česká státní norma (technická norma)

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

D.....	rychlost difúze
e.....	modelem nevysvětlitelná variabilita
F.....	hodnota testovacího kritéria F-testu
FeSi.....	ferrosilicium
(g).....	prvek v plynné fázi
G.....	Gibbsova energie
ΔG	celková hodnota Gibbsovy energie
GJL.....	litina s lupínkovým grafitem
GJS.....	litina s kuličkovým grafitem
ΔH	celkové rozpouštěcí teplo 1 molu plynu
h.....	výška kelímku indukční pece
ChP.....	chyba průměru
IPSF.....	elektrická indukční středofrekvenční kelímková pec
k.....	Boltzmanova konstanta
K_R	rovnovážná konstanta reakce
K_X	rovnovážná konstanta prvku X
(l).....	prvek v kapalně fázi
max.....	maximální hodnota v souboru dat
Me.....	medián
min.....	minimální hodnota v souboru dat
O_{OX}	obsah celkového kyslíku ve formě oxidů
p.....	statistická hodnota určující zda je možné danou hypotézu zamítnout
p.....	tlak plynu
p_{ATM}	hodnota atmosférického tlaku
p_{CO}	parciální tlak oxidu uhelnatého
$p_{CO TP}$	parciální tlak oxidu uhelnatého při teplotě tavení

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

p_{M+A}	součet metalostatického a atmosférického tlaku
ppm.....	pers par milion
p_{X2}	parciální tlak daného plynu
r	poloměr bubliny
R	plynová konstanta
REM.....	řádkovací elektronový mikroskop
(s).....	prvek v pevné fázi
S1-S6.....	označení slévárenského provozu
St_p^1	stupeň přehřátí pro oblast tavení
St_p^2	stupeň přehřátí pro oblast varu
s_x	směrodatná odchylka
T	teplota v kelvinech
t	teplota ve stupních celsia
t	hodnota testovacího kritéria Studentova testu
t_p	teplota tavení v peci
t_{PUV}	teplota počátku uhlíkového varu
t_R	rovnovážná teplota
v	rychlost vyplouvání bubliny
X	množství atomárně rozpuštěného plynu v kovu

I.....	soubor dat vztahující se k natavení vsázky
II.....	soubor dat vztahující se k určité časové prodlevě
III.....	soubor dat vztahující se k udržovacímu zařízení
IV.....	soubor dat vztahující se k procesu očkování
V.....	soubor dat vztahující se k procesu modifikace
VI.....	soubor dat vztahující se k procesu lití na lici lince

σ	povrchové napětí
η	viskozita
ρ	hustota
τ_1	doba výdrže na teplotě tavení
τ_2	doba výdrže v oblasti uhlíkového varu
γ_1	hustota kovu
γ_2	hustota plynu
\varnothing	průměr

1. Úvod

Slévárenské provozy se již od prvopočátku potýkají s širokou škálou problémů, mezi něž patří také obsah plynů v tekutém kovu, jejichž vysoký obsah může být příčinou výskytu slévárenských vad, které v konečném důsledku vždy snižují kvalitu vyrobených odlitků a zvyšují ekonomické náklady výroby.

Dle literatury [1] jsou plyny z 50% hlavní příčinou zmetkovitosti u odlitků litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem, z 35% u ocelových odlitků a z 40% u odlitků z neželezných kovů.

Obsahem plynů, zejména pak obsahem kyslíku, se zabývá celá řada autorů [2,3,4,5], kteří mají odlišný názor na úlohu plynů v litině a jejich vliv při vzniku endogenních bublin. Pro objasnění termodynamických pochodů, které probíhají při tavení a mimopecním zpracování litiny jsou doposud stále využívány poznatky získané z oblasti výroby a zpracování oceli.

Při výrobě oceli probíhá většina metalurgických reakcí v roztavené lázni při teplotách vyšších než 1700°C. Rztavená lázeň představuje polykomponentní roztok (roztok železa s uhlíkem, sírou, kyslíkem, vodíkem, dusíkem apod.), který se z hlediska fyzikálně chemických základů ocelářských reakcí řídí Rauoltovým zákonem [6].

Většina metalurgických reakcí při výrobě litiny probíhá pod teplotou 1600°C (tavení v IPSF okolo 1550°C, tavení v kuplovnách okolo 1480°C atd.). Tekutý kov představuje opět polykomponentní roztok (roztok železa s uhlíkem, křemíkem, manganem, sírou, kyslíkem, apod.), kdy se však fyzikálně chemické vlastnosti litiny výrazně liší od oceli a v současné době existuje celá řada hypotéz, které se snaží definovat roztavenou litinu jako reálný, případně suspenzní, či koloidní roztok. Jedna z hypotéz definuje litinu, dle autora [7], jako disperzní kovovou látku, kde α -železo označujeme jako dispergát (rozpustidlo) a ostatní složky (grafit, cementit, steadit, ...) jako dispersáty (látky rozpouštěné). V důsledku těchto skutečností se mění charakter chemických reakcí (např. rychlost) probíhajících v roztavené litině.

2. Cíl práce

Cílem předložené práce je:

♦ na základě chemického složení, teplotních, tlakových a časových podmínek analyzovat provedená měření v průběhu tavení a mimopecního zpracování litiny

♦ zhodnotit vliv chemického složení, teplotního, tlakového a časového průběhu tavení a mimopecního zpracování na obsah kyslíku, dusíku a výskyt endogenních bublin

♦ objasnit termodynamické pochody, které probíhají při tavení a mimopecním zpracování litiny, vzhledem k výskytu možných slévárenských vad, způsobených přítomností plynů v tekutém kovu

a to při tavení v elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecích (IPSF) a bubnových rotačních plynových pecích (BRPP).

Součástí práce je také stanovení podmínek, které je nutné dodržet v průběhu tavení a mimopecního zpracování tekutého kovu jako preventivního opatření pro zamezení výskytu výše uvedené slévárenské vady.

3. Plynů v železe a jeho slitinách

Při ohřevu, tavení a odlévání přicházejí železné kovy a jejich slitiny do styku s plyny, jejichž zdrojem může být vsázka, atmosféra použitá při daném technologickém procesu, chemické reakce probíhající přímo v kovové lázni a v neposlední řadě i chemické reakce probíhající na rozhraní forma-kov. Styk plynů s kovem probíhá zpravidla za značně vysokých teplot a za určitého přetlaku těchto plynů, které jsou v různé míře disociovány nebo ve stavu zrodu. [6]

Výsledkem vzájemných interakcí plynu a kovu v kapalném i tuhém stavu může být vznik roztoku plynu v tuhém nebo kapalném stavu, různých chemických sloučenin plynu se základním kovem a jeho dalšími složkami nebo plynových bublin (disperze plynu v kovu). [7]

Tekutý kov při styku s plyny s nimi buď reaguje a rozpouští v sobě, v různé míře, produkty reakce nebo tyto plyny pohlcuje bez chemické vazby. Tento různý způsob rozpouštění závisí na parciálním tlaku plynu v atmosféře, na teplotě, na druhu plynu a kovu, jejich vzájemné reaktivnosti a rozpustnosti produktu reakce v kovu. [8]

3.1 Pohlcování plynu kovem

Reakce plynů s tekutým kovem probíhají v několika, po sobě následujících a současně vzájemně se překrývajících etapách [7]:

- 1.) Adsorpce
- 2.) Disociace
- 3.) Difúze
- 4.) Chemické reakce

V počáteční etapě nazývané jako *adsorpce*, dochází ke zvýšení koncentrace molekul, případně i atomů plynu z pecní atmosféry na mezifázovém rozhraní kov-pecní atmosféra. S rostoucí teplotou se zvyšuje množství adsorbovaného plynu na povrchu taveného kovu.

Etapa *disociace* je charakterizována rozkladem dvouatomových adsorbovaných molekul plynu na atomy, který můžeme obecně vyjádřit rovnicí $\frac{1}{2} X_2 (g) \leftrightarrow | \% X |$ a je doprovázena spotřebou tepla ($\Delta H_{\text{dis}} > 0$). Plyn, který po chemické adsorpci disociuje a je povrchem taveniny pohlcen, může difundovat do taveniny. Uvolněná místa na povrchu taveniny jsou nahrazována atomy plynu. Čím větší bude koncentrace daného plynu v pecní atmosféře, tím více se bude absorbovat povrch taveniny, tím více atomů bude pronikat do kovu a tím rychleji bude probíhat následující etapa - *difúze*. [8]

Difúzí dochází k přestoupení atomů plynu z mezifázové hranice pecní atmosféra-tavenina do objemu taveniny. Na difúzi disociovaného plynu má vliv nejen složení kovu, ale také stav jeho povrchu, teplota a rozdíl tlaku plynu v tavenině a v okolní atmosféře. Rychlost difúze plynu je přímo úměrná rozdílu jeho koncentrace v kovu a okolí. Při dané teplotě a tlaku probíhá v tlustých vrstvách kovu pomaleji než v tenkých vrstvách. Rychlost difúze v závislosti na teplotě je dána vzorcem (1), [8]:

$$D = a * e^{\frac{q}{T}} \quad (1)$$

kde : **D** rychlost difúze

a, q konstanty

T teplota /K/

Chemické reakce jsou poslední etapou daného procesu, kdy mezi atomy plynu a taveniny vznikají, případně zanikají, chemické sloučeniny jako jsou např. oxidy, nitridy, hydridy,

Etapy 1-3 v obráceném pořadí charakterizují kinetiku procesu uvolňování plynu z kovu – desorpci.[7]

K proběhnutí výše uvedených pochodů je zapotřebí určitého času. Obecně platí, že čím delší je doba styku plynu s taveninou, tím více se obsah plynu v kovu blíží stupni nasycení při daném tlaku a teplotě.

O tom, do jaké míry je plyn pohlcován kovem rozhoduje rozdíl tlaku plynů v plynné atmosféře a tlaku plynů v tavenině. Plyn se snaží rozdělit mezi kapalnou a plynnou fázi tak, aby byla zachována rovnováha. V případě, že tlak plynu v atmosféře bude vyšší než tlak plynu v tavenině, bude docházet k pohlcování plynu taveninou. Pokud bude tlak plynu v atmosféře nižší než tlak daného plynu v tavenině, bude docházet k uvolňování plynu z taveniny do atmosféry. [8]

3.2 Rozpustnost plynů v kovu

Závislost rozpustnosti plynu v kovu na parciálním tlaku určuje tzv. Sievertův zákon, kdy množství atomárně rozpuštěného plynu v kovu je úměrné druhé mocnině parciálního tlaku tohoto plynu v atmosféře (2). [7]

$$[\% X] = K_x \cdot \sqrt{p_{x2}} \quad (2)$$

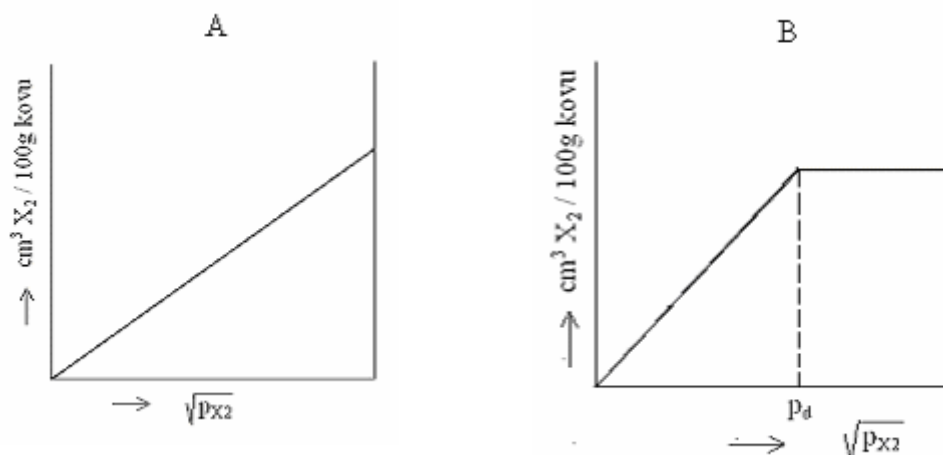
kde: **X** ... množství atomárně rozpuštěného plynu v kovu /%/

K_x ... rovnovážná konstanta /1/

p_{x2} ... parciální tlak daného plynu v atmosféře nad kovem /Pa/

Rovnovážná konstanta **K_x** je specifická pro každý kov a plyn a může v závislosti na teplotě měnit svou hodnotu zcela odlišně v rozmezí teplot, při nichž daný kov přechází ze stavu tekutého do stavu pevného a naopak.

Řídí-li se rozpouštění plynů v kovech přesně Sievertovým zákonem, jde o atomární charakter procesu rozpouštění. Atomy plynu netvoří s kovem ani jeho sloučeninami chemické sloučeniny, ale atomární roztok-obr.č.1-A. Případ, kdy může vzniknout jednak atomární roztok ($p < p_d$), jednak sloučenina nerozpustná v kovu ($p > p_d$), je znázorněn na obr.č.1-B. [7]



Obr.č.1: Průběhy rozpouštění plynu v kovu v závislosti na parciálním tlaku při konstantní teplotě

Závislost rozpustnosti plynu v kovu na teplotě za konstantního tlaku
 můžeme vyjádřit rovnicí (3):

$$[\% X] = C * e^{-\frac{\Delta H}{2kT}} \quad (3)$$

kde : **X** ... množství atomárně rozpuštěného plynu v kovu /%/

C ... konstanta závisující na povaze plynu a kovu

ΔH ... celkové rozpouštěcí teplo 1 molu plynu

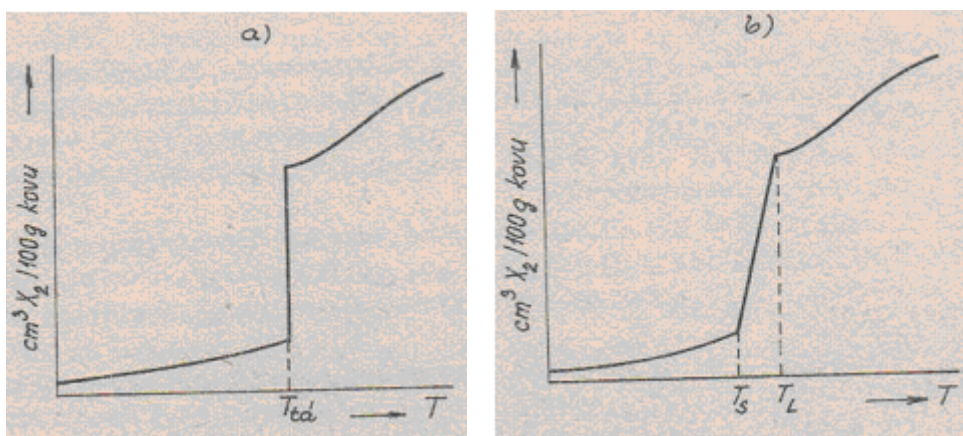
k ... Boltzmanova konstanta

T ... teplota /K/

V roztaveném kovu je množství rozpuštěného plynu vyšší než v tuhém kovu. Tato skutečnost způsobuje problémy při tuhnutí taveniny, kdy se přebytek rozpuštěného plynu v tekutém kovu uvolňuje formou plynových bublin. Snižování rozpustnosti plynu v roztaveném kovu od určité teploty k teplotě varu souvisí s vypařováním kovu a se vzrůstem parciálního tlaku jeho par. K prudké změně rozpustnosti plynu může dojít při přeměnách krystalografických modifikací.[7]

Je-li rozpouštění plynu v tekutém kovu exotermickou reakcí, rozpustnost plynu se vzrůstající teplotou klesá, je-li reakcí endotermickou, rozpustnost plynu se v tekutém kovu zvyšuje. Rozpustnost plynů v tekutém kovu je ve většině případů pochodem endotermickým, proto rozpustnost plynů se stoupající teplotou roste.

Obecný průběh rozpustnosti plynu v čistém kovu a ve slitině v závislosti na teplotě je znázorněn na obr.č.2.[7]



Obr.č.2: Průběh rozpustnosti plynu v čistém kovu (a) a ve slitině (b)

Závislost rozpustnosti plynu v kovu na druhu plynu můžeme rozdělit z hlediska jejich vzájemných interakcí do čtyř základních skupin. [7]

V první skupině jsou obsaženy plyny, které jsou při všech teplotách vůči kovům a jejich slitinám netečné – tzn., že nedochází k jejich disociaci ani difúzi (Ar, He). Z těchto důvodů jsou používány jako prostředky ke snížení obsahu jiných plynů v taveninách kovů, ale zejména také jako spolehlivé ochranné atmosféry při ohřevu, tavení a odlévání kovů.

Do druhé skupiny jsou zařazeny plyny, které obsahuje normální atmosféra a velmi silně působí na kovy a slitiny (O_2 , H_2 , N_2). Tyto plyny mohou s některými kovy tvořit roztoky, s jinými stabilní chemické sloučeniny – oxidy, nitridy, hydridy.

Třetí skupinu tvoří plyny, které jsou při styku s kovem schopny disociovat na jeho povrchu za vzniku atomů kyslíku, uhlíku, vodíku, síry apod. Tyto plyny se při vysokých teplotách projevují jako dezoxidovadla.

Poslední, čtvrtá, skupina zahrnuje plyny, které jsou za určitých podmínek schopny při disociaci tvořit vodík a uhlík (uhlovodíky C_mH_n), dusík a vodík (NH_3) apod. Jednotlivé prvky v atomárním stavu mohou s kovy tvořit roztoky nebo chemické sloučeniny – karbidy, nitridy...

Závislost rozpustnosti plynu na druhu kovu může být velmi rozdílná a je vždy třeba posuzovat vzájemnou interakci mezi plynem a kovem pro konkrétní

kov a plyn. Podle náročnosti na opatření ke snížení rozpuštěného plynu při ohřevu, tavení a odlévání je možné kovy a slitiny rozdělit do dvou skupin.[7]

První skupinu tvoří kovy (Ti, Zr, V, Ta, Mo, W...), jejichž ohřev, tavení a odlévání je nutno provádět ve vakuu (při sníženém celkovém tlaku) nebo v ochranné atmosféře (inertní plyny – He, Ar).

Druhá skupina je tvořena kovy (Fe, Al, Mg, Cu, Ni, Zn...), jejichž ohřev, tavení a odlévání nevyžaduje zvláštních opatření. K zamezení styku taveniny s plynnou atmosférou jsou používány krycí strusky, ochranné zásypy apod.

Množství rozpuštěného plynu v kovu je možné vyjádřit hmotnostními procenty, cm^3 plynu rozpuštěného ve 100g kovu při normálních podmínkách (0°C a tlaku 101,3 kPa) nebo jednotkami ppm.[7]

Z výše uvedeného je patrné, že rozpouštění plynu v kovu je složitou funkcí rozpustnosti a difúzní schopnosti, tzn., že závisí na druhu kovu a plynu, jeho parciálního tlaku a stupni disociace, na teplotě a disociačním teple, na chemické aktivitě a aktivační energii, na viskozitě kovu a styčné ploše s plynnou fází pro jednotku objemu kovu a také na pohybu taveniny, jímž mohou být některé z uvedených veličin podstatně zvětšeny a četné reakce urychleny.

3.3 Vylučování plynů z tekutého kovu

K vylučování plynů z taveniny dochází buď v případě, že tlak plynů v atmosféře nad taveninou je menší než tlak plynů v tavenině, nebo když dojde k poklesu teploty taveniny a roztok plynů se stane při nižších teplotách přesyceným, neboť rozpustnost plynů v kovu se snižující se teplotou klesá. Plyny se pak mohou z kovu odstranit buď cestou difúze – desorpce, nebo cestou vyplouvání plynových bublin, případně kombinací obou uvedených cest.[8]

Odplynění taveniny desorpcí probíhá tehdy, pokud se plyn v tavenině nachází v atomárním stavu a došlo-li poklesem tlaku nebo teploty k snížení jeho rozpustnosti. Sloučeniny plynů mohou být odstraněny desorpcí, pouze jsou-li disociovány. Pokud zůstanou v molekulárním stavu, mohou být z taveniny odstraněny jen v podobě plynových bublin.

Tvorba plynových bublin je snadnější za přítomnosti zárodku uvnitř taveniny. Zárodky mohou být malé krystaly, nekovové vměsky, stěny formy apod.[8]. Při tvorbě a vyplouvání těchto bublin musí tlak vylučujících se plynů převýšit tlak vnější (4) .

$$p_{\text{plynů}} > p_{\text{vnější}} \quad (4)$$

kde:

$$p_{\text{plynů}} = \sum p_i = p_{\text{H}_2} + p_{\text{N}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + \dots \quad (5)$$

$$p_{\text{vnější}} = p_{\text{atm}} + p_{\text{kovu}} + p_{\text{kapilární}} = p_{\text{atm}} + (h \cdot \rho \cdot g) + (2\sigma / r) \quad (6)$$

Pouze při splnění této podmínky vyplouvá vytvořená bublina směrem k povrchu rychlostí určenou Stokesovým zákonem (7).

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{\eta} \quad (7)$$

kde : v rychlost vyplouvání

g konstanta přitažlivosti zemské

r poloměr bubliny

ρ_1, ρ_2 hustota kovu a plynu

η viskozita

Vzhledem k tomu, že parciální tlak atomárního plynu je uvnitř bubliny nulový, může do ní tento difundovat, asociovat se v molekuly a poskytnout tímto možnost difúze dalším atomárním plynům do bubliny. Do bubliny mohou vstoupit všechny plyny rozpuštěné v tavenině, pokud je jejich parciální tlak v bublině nižší než v tavenině.

Vyplouvání bublin z tekutého kovu je možné v praxi urychlit snížením atmosferického tlaku (litím ve vakuu), povrchového napětí a viskozity.[8]

Podle původu rozeznáváme v metalurgii dva druhy plynů – plyny endogenní a plyny exogenní.

Endogenní plyny jsou vylučovány přímo z tekutého kovu a jejich zdrojem může být vlhká, rezavá nebo zaolejovaná vsázka, pecní atmosféra, produkty hoření.

Exogenní plyny jsou plyny, které se do tekutého kovu dostaly zvenčí – např. při odlévání kovu do slévárenské formy, při chemických reakcích mezi tekutým kovem a slévárenskou formou či jádrem apod.

Z pohledu chemického se v metalurgii setkáváme s těmito plyny a jejich sloučeninami – vodíkem, dusíkem a kyslíkem.

3.4 Vodík

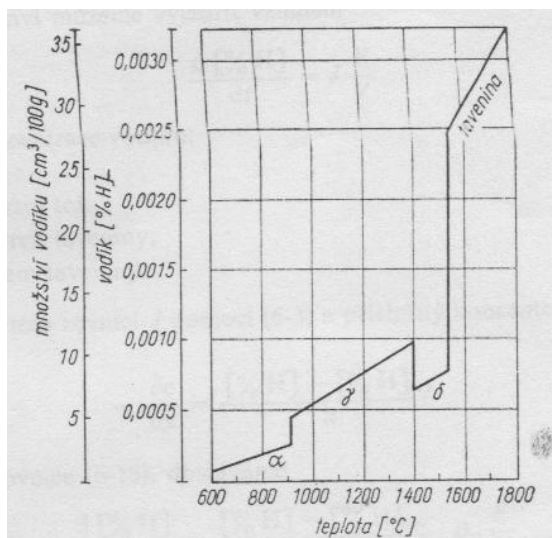
Vodík – hydrogenium (H) – prvek I.A skupiny periodického systému prvků s protonovým číslem 1. Byl objeven v roce 1766 Henrym Cavendishem a ve výskytu na Zemi zaujímá třetí místo (hned po kyslíku a křemíku) [9]. Základní fyzikální vlastnosti vodíku jsou uvedeny v tab.č.1.

Tab.č.1: Fyzikální vlastnosti vodíku

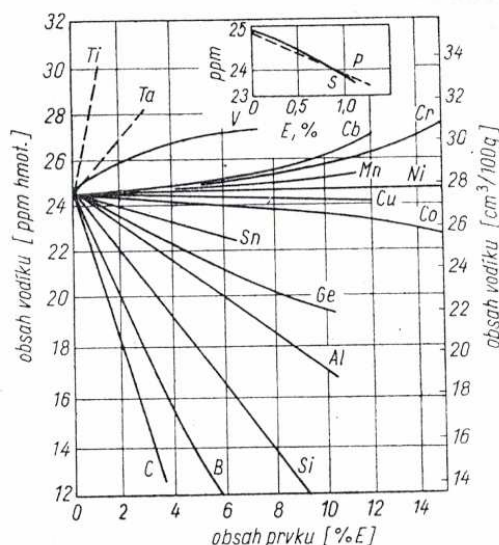
Teplota tání	°C	- 259,2
Teplota varu	°C	- 240,0
Kritický tlak	MPa	1,315
Hustota	kg.cm ⁻³	0,090.10 ³

Vodík řadíme mezi plyny bez barvy, chuti a zápachu. Za normální teploty je málo reaktivní, při vyšších teplotách reaguje silně až explozivně s mnoha prvky za vzniku hydridů (MH_n, M_mH_n)[10]. Z metalurgického hlediska je

vodík jediným plynem schopným difundovat do kovů a jejich slitin již za normální teploty [7]. Většina kovů rozpouští v závislosti na teplotě rozdílné množství vodíku v tuhém i kapalném stavu – obr.č.3.



Obr.č.3: Vliv teploty na rozpustnost vodíku v železe při tlaku 1 atm [11]



Obr.č.4: Vliv prvků na rozpustnost vodíku v taveninách Fe-E-H při 1600°C a tlaku 1 atm [11]

Podle druhu procesu rozpouštění vodíku můžeme kovy rozdělit do dvou základních skupin. Do první skupiny zařazujeme kovy, u nichž je proces rozpouštění vodíku procesem endotermickým, např. železo, nikl, měď. V druhé skupině se nacházejí kovy, u nichž proces rozpouštění vodíku má charakter exotermický, např. vanad, titan, cín. Vliv některých prvků na rozpustnost vodíku v železe je na obr.č.4.

Hlavním zdrojem vodíku v metalurgii, tedy při ohřevu a tavení kovů, je voda (např. z nové, nedostatečně vysušené vyzdívky) a uhlovodíky (např. atmosféra plamenných pecí).

V železe a jeho slitinách se vodík může nacházet buď v atomárním nebo molekulárním stavu a jeho obsah závisí při dané teplotě a tlaku na stupni disociace molekulárního vodíku v atmosféře, přičemž proces disociace probíhá jak při styku molekul s povrchem, tak i přímým působením teploty (se stoupající teplotou roste množství disociovaného vodíku). Obsah vodíku v litinách tavených v různých tavících agregátech je uveden v tab.č.2.

Tab.č.2: Obsah vodíku v litině uváděné v literatuře [17],[18],[19]

tavící agregát	tavený materiál	obsah vodíku /ppm/
studená kuplovna	GJL	1,0 – 2,0
kuplovna s kys.vyzdívkou	GJL	1,0
kuplovna vyzdřená šamotem	GJL	< 1,0
rotační plynová pec	GJL	< 1,0
elektrická oblouková pec	GJS	< 1,0
indukční pec	GJL	5,0 – 6,0

vysvětlivky : GJL...litina s lupínkovým (lamelárním) grafitem,

GJS...litina s kuličkovým (sferoidálním) grafitem

Vliv vodíku rozpuštěného v tavenině na konečnou kvalitu kovu je vždy nepříznivý, neboť vodík např. snižuje hodnoty mechanických vlastností (houževnatost), u ocelí způsobuje vznik tzv. vloček apod.

Pro zamezení růstu obsahu vodíku v tavenině je nutné tavit daný kov ve vakuu, pro snížení obsahu vodíku využít, u slitin železa, uhlíkové reakce, případně kovovou lázeň promíchávat inertním plynem.

3.5 Dusík

Dusík – nitrogenium (N) – prvek V.A skupiny periodického systému prvků s protonovým číslem 7. Byl objeven v roce 1772 Danielem Rutherfordem a řadí se mezi nejrozšířenější prvky atmosféry dostupné v nesloučené formě. V horninách zemské kůry a zeminách se vyskytuje relativně vzácně. [9] Základní fyzikální vlastnosti vodíku jsou uvedeny v tab.č.3.

Tab.č.3: Fyzikální vlastnosti dusíku

Teplota tání	°C	210,0
--------------	----	-------

Teplota varu	°C	195,8
Hustota	kg.cm ⁻³	1,002.10 ⁻³

Dusík patří mezi plynné prvky, který se vyskytuje jak v molekulární, tak i atomární formě. Molekulární dusík –N₂– je bezbarvý, diamagnetický plyn bez chuti a zápachu, který je za běžných podmínek inertní díky vysoké pevnosti vazby N≡N a vysokému energetickému rozdílu mezi nejvyššími obsazenými a nejnižšími neobsazenými orbitály. Aktivovat dusík v podobě dvouatomových molekul je možné jen vysokou teplotou, elektrickým výbojem nebo jeho stykem s katalyzátorem. Atomární dusík –N– je naopak velmi reaktivní a reaguje s mnoha prvky na nitrity, s vodíkem reaguje za vzniku amoniaku, s kyslíkem za vzniku oxidu dusného (NO). [10]

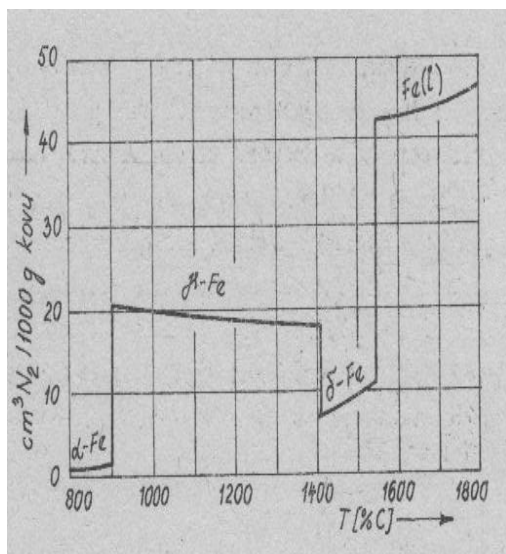
Ve vztahu ke kovům a jejich slitinám je dusík méně aktivním plynem, než např. vodík a kyslík. Obsah dusíku v litinách tavených v různých tavících agregátech je uveden v tab.č.4.

Tab.č.4: Obsah dusíku v litině uváděné v literatuře [5],[17],[18],[19]

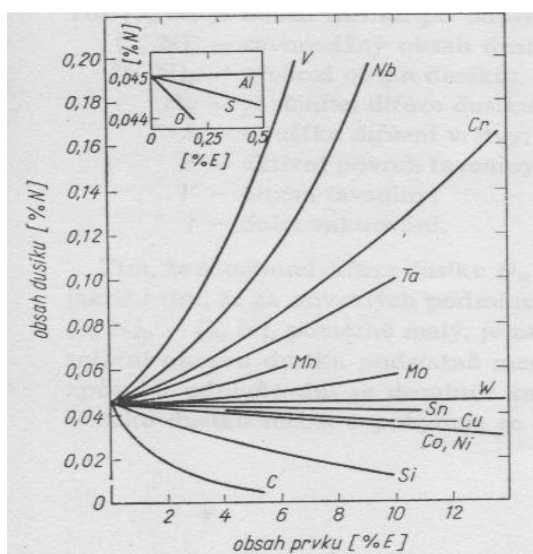
tavící agregát	tavený materiál	obsah dusíku /ppm/
studená kuplovna	GJL	50-60
kuplovna vyzdřená šamotem	GJL	50-70
rotační plynová pec	GJL	100
elektrická oblouková pec	GJS	100
indukční pec	GJL	80-100

vysvětlivky : GJL...litina s lupínkovým grafitem, GJS...litina s kuličkovým grafitem

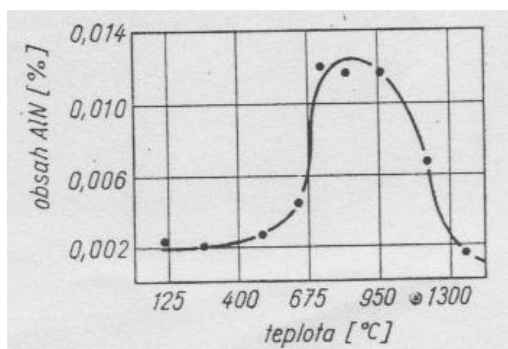
Disociace molekul dusíku je v důsledku již výše zmiňované vazby malá a proto i rozpustnost dusíku je ve většině kovů nízká – obr.č.5 a 6.



Obr.č.5: Rozpustnost dusíku v železe v závislosti na teplotě ($p_{N_2} = 101,3 \text{ kPa}$) [7]



Obr.č.6: Vliv prvků na rozpustnost dusíku v roztaveném železe při teplotě 1600°C a tlaku 1 atm [7]



Obr.č.7: Obsah nitridu hliníku v oceli v závislosti na teplotě [11]

Např. s mědí, stříbrem, zinkem, olovem a s některými dalšími kovy netvoří dusík v reálných podmínkách tavení ani chemické sloučeniny, ani roztoky. S hliníkem tvoří při teplotě okolo 900°C stabilní nitrid AlN , (obr.č.7), který v tavenině zůstává jako tuhý vměstek, s hořčíkem, při dosažení jeho teploty tání, tvoří nitrid Mg_3N_2 .

Můžeme tedy říci, že pro výše jmenované kovy není dusík výrazně škodlivým prvkem, neboť nezhoršuje jejich vlastnosti. Na straně druhé jsou však kovy jako např. železo, titan, mangan, cer a jiné, které v kapalném stavu dusík rozpouštějí a tvoří s ním chemické sloučeniny. Vliv dusíku na mechanické vlastnosti těchto slitin je v konečném důsledku škodlivý. V metalurgii je však také u některých odlitků obsah dusíku záměrně zvyšován. Jedná se o proces nitridace nebo nitrocementace a výsledkem daného procesu je zvýšení tvrdosti povrchu daných výrobků.

3.6 Kyslík

Kyslík – oxigenium (O) – prvek VI.A skupiny periodického systému prvků s protonovým číslem 8. Byl objeven v roce 1773-4 C.W.Scheelem a Josephem Priestleyem. Je nejrozšířenějším prvkem na zemském povrchu. Vyskytuje se nejen jako volný prvek, ale také vázaný v mnoha sloučeninách. [9] Základní fyzikální vlastnosti kyslíku jsou uvedeny v tab.č.5.

Tab.č.5: Fyzikální vlastnosti kyslíku

Teplota tání	°C	218,8
Teplota varu	°C	182,9
Hustota	kg.cm ⁻³	1,4.10 ³

Již za normální teploty je kyslík vysoce reaktivní plyn, bez barvy, chuti a zápachu, který s ostatními prvky tvoří oxidy [10].

S většinou kovů tvoří kyslík stabilní chemické sloučeniny–oxidy, jejichž stabilita závisí na afinitě daného kovu ke kyslíku. Afinitu můžeme v tomto případě vyjádřit velikostí disociačního tlaku plyné složky p_{O_2} , kdy vliv atmosférického kyslíku na jeho interakce s kovem je tím větší, čím větší je rozdíl parciálního tlaku kyslíku v atmosféře ($p_{O_2}^*$) a disociačního tlaku kyslíku při určité teplotě, dle (8). [7]

$$\Delta p = p_{O_2}^* - p_{O_2} \quad (8)$$

Rozdíl Δp s rostoucí teplotou klesá.

Podle druhu reakcí kovu s kyslíkem můžeme kovy rozdělit do tří skupin. Do první skupiny patří kovy, které v tuhém ani kapalném stavu kyslík nerozpouštějí – např. hliník, hořčík, zinek, olovo, aj. a lze je proto tavit na vzduchu, bez speciální atmosféry. V druhé skupině se nacházejí kovy, které v kapalném stavu rozpouštějí velké množství kyslíku za vzniku roztoku – železo, měď, nikl, stříbro aj. – tyto kovy je nutné chránit před stykem se vzdušným kyslíkem např. použitím ochranných strusek, případně tavení provádět v inertní atmosféře. Třetí skupina obsahuje kovy, které kyslík ani nerozpouští, ani s ním nereagují – zlato, platina, rtuť – jejich tavení lze provádět bez použití zvláštních opatření.[7]

Charakter reakcí kovů s kyslíkem určuje také rozsah jejich znečištění oxidy a způsob jejich rafinace.

V železe a jeho slitinách se kyslík nachází ve formě oxidů – FeO, SiO₂, MnO, Al₂O₃, CO, CO₂ a dalších. Malá část kyslíku se může nacházet v atomárním stavu. Převážná část kyslíku je však v železe a jeho slitinách rozpuštěna v podobě FeO,

jehož rozpustnost je ovlivněna obsahem redukujících prvků, jako je např. uhlík, mangan, křemík, hliník.[8]

Kyslík, obdobně jako ostatní plyny, působí negativně na výslednou kvalitu výrobku a proto je nutné ať již kyslík rozpuštěný nebo jeho oxidy z taveniny odstranit některým z mnoha způsobů dezoxidace, které jsou blíže popsány v kapitole 5. *Dezoxidace litin, str.37-40.*

3.6.1 Úloha kyslíku v metalurgii

3.6.1.1 Kyslík při výrobě oceli

Kyslík patří k nejvýznamnějším prvkům, jak při výrobě oceli, tak i z hlediska jeho vlivu na užité vlastnosti vyrobeného kovu, neboť se aktivně účastní prakticky všech etap výroby. Kyslík rozpuštěný v železe výrazně mění mechanické, magnetické, elektrické a jiné vlastnosti železa [11].

Údaje o rozpustnosti kyslíku v jednotlivých modifikacích železa se dosti liší, neboť rozpustnost kyslíku silně závisí na obsahu dalších prvků [12]. Rozpustnost kyslíku v roztaveném železe roste přibližně lineárně s teplotou [13] a maximální rozpustnost kyslíku v roztaveném železe za teploty tání železa je 0,21% [11], rozpustnost kyslíku v železe γ je 0,003 – 0,004%, v železe α pouze 0,002% [14]. Pokud jde o formu existence kyslíku rozpuštěného v roztaveném železe, uvažovaly se nejprve oxidy FeO, příp. Fe₂O₃, poté atomární kyslík O a konečně aniont O²⁻. Vzhledem k tomu, že v soustavách Fe-O v celém metalurgicky zajímavém zkoumaném koncentračním rozmezí pozorujeme intersticiální charakter roztoků kyslíku, nemůže se v roztaveném železe ve formě aniontů O²⁻ vyskytovat. Pravděpodobnější je existence menších, tj. kladných iontů v mřížce železa, např. O⁴⁺, což je v souladu s teoretickými představami Grigoroviče [15].

V ocelářství má kyslík nežádoucí účinky, neboť při vyšším obsahu kyslíku v oceli tvoří tzv. oxidické vměstky, které výrazným způsobem ovlivňují čistotu oceli,

čímž současně zhoršují mechanické a technologické vlastnosti oceli [13]. Proto má velký praktický význam znalost obsahu, případně aktivity kyslíku při výrobě oceli, která spočívá v dokonalejším a přímém řízení výroby oceli – pozitivní ovlivnění průběhu dezoxidace, odfosfoření, oduhličení a odsíření, čímž lze zajistit vyšší kvalitu vyráběné oceli [16].

3.6.1.2 Kyslík při výrobě litiny

V roztavené litině je kyslík obsažen v podstatně nižších koncentracích než v oceli a je jedním z důležitých prvků ovlivňující krystalizaci, konečnou strukturu a s ní související užité vlastnosti odlitků odlévaných z tohoto materiálu. Obsah kyslíku v litinách tavených v různých tavících agregátech je uveden v tab.č.6.

Tab.č.6: Obsahy kyslíku uváděné v literatuře [5],[17],[18],[19]

tavící agregát	tavený materiál	obsah kyslíku /ppm/
studená kuplovna	GJL	42 – 86
kuplovna s kys.vyzdívkou	GJL	10 -14
kuplovna vyzdřená šamotem	GJL	5 - 6
předpecí kuplovny	GJL	43,5
rotační plynová pec	GJL	133 - 148
oblouková pec (tech . s oxidací)	GJL	29 - 63
oblouková pec (tech.bez oxidace)	GJL	30 - 53
elektrická oblouková pec	GJS	22 – 64 *, 9 – 38 **

indukční pec	GJL	10 – 34, 114**
--------------	-----	----------------

vysvětlivky : GJL-litina s lupínkovým (lamelárním) grafitem,

GJS-litina s kuličkovým (sferoidálním) grafitem,

** před modifikací, ** po modifikaci*

V roztavené litině se nachází kyslík ve dvou fázích :

- a) v plynné fázi - rozpuštěný v roztoku taveniny ($O_{\text{volný}}$)
- b) v pevné fázi - tvořící oxidy s důležitými prvky nacházejícími se v tavenině ($O_{\text{vázaný}}$).

$$O_{\text{celkový}} = O_{\text{vázaný}} + O_{\text{volný}} \quad (9)$$

V současné době neexistuje metoda přímého stanovení celkového obsahu kyslíku rozpuštěného v litině, umíme však určit obsah vázaného kyslíku a pomocí kombinované sondy nebo speciálních senzorů stanovit aktivitu volného kyslíku [5].

Vázaný kyslík je v odborné literatuře označován jako celkový obsah kyslíku ve formě oxidů – O_{ox} . Obsah chemicky vázaného kyslíku se stanovuje metodou vysokoteplotní extrakce, kdy se plynule zvyšuje teplota měřeného vzorku. Kyslík se postupně redukuje podle termodynamické stability oxidů, ve kterých je vázán. Při vysokých teplotách jsou redukovány např. oxidy titanu, hliníku, vápníku a kovů vzácných zemin, při vyšších teplotách středně stabilní oxidy – např. oxid křemičitý. Při nízkých teplotách se pak redukují málo stabilní oxidy, např. oxidy železa a manganu. Výzkum chemicky vázaného kyslíku v litinách probíhal zejména v 70. letech minulého století v Německu – Institut für Giessereitechnik, Düsseldorf a výsledky tohoto výzkumu publikované v odborné literatuře [2,3,20,21,22,48,49] nám podávají základní informace o chování vázaného kyslíku v průběhu tavení, mimopecního zpracování a tuhnutí odlitků [23]. V současné době umožňují spektrometrické přístroje stanovení celkového obsahu kyslíku ve formě oxidů přímo ve slévárenském provozu.

Volný kyslík označujeme jako metalurgicky aktivní kyslík a jeho koncentraci jako aktivní koncentraci neboli aktivitu. Aktivním kyslíkem, respektive stanovením jeho aktivity a jeho vlivem na výskyt bodlin u litinových odlitků se v posledních letech zabývá řada prací [24,25,26,27,28,29,30]. Hodnota aktivity kyslíku je získávána výpočtem na základě naměřeného napětí a teploty, kdy jsou obě tyto fyzikální veličiny přístrojově zjišťovány termosondami nebo měrkami (kyslíkovými senzory) odvozenými od použitého typu sondy.

Přítomnost kyslíku v tekutém kovu má negativní, ale i pozitivní účinek. Jako negativní účinek lze označit vady odlitků z titulu endogenní nebo exogenní bublinatosti, vznik většího množství kyselé strusky a vznik pevných vměstků narušujících homogenitu základní kovové hmoty litiny. Jako pozitivní účinek kyslíku lze označit tvorbu zárodkové fáze grafitu, tj. heterogenní nukleaci, která podporuje stabilní tuhnutí litiny. [31,32]

K tvorbě zárodků grafitu dochází při vyšších teplotách taveniny, intenzivněji však proces zárodkování probíhá v období eutektické prodlevy. V této době by mělo být v tavenině optimální množství volného kyslíku způsobujícího tvorbu zárodkové fáze.

Přítomnost kyslíku v tavenině ovlivňuje také průběh očkování a modifikace. Oba tyto zásahy do krystalizace litin mají dezoxidační charakter se schopností vytvářet vysokou grafitizační schopnost taveniny umožňující stabilní tuhnutí litiny.

Je proto důležité znát optimální obsah volného kyslíku v tavenině, jeho aktivitu v závislosti na teplotě a chemickém složení taveniny.

3.7 Plynové vady odlitků

Vady odlitků způsobené nadměrným obsahem plynů v tekutém kovu, slévárenské formě nebo plyny vznikajícími při objemových změnách při tuhnutí odlitku se podílejí na celkové zmetkovitosti sléváren oceli i šedé litiny z jedné pětiny a dle četnosti výskytu zaujímají třetí místo za vměstky a vadami tvaru, rozměru a hmotnosti.[1]

Plynové vady odlitků řadíme, dle normy ČSN 42 1240 a literatury [1], do skupiny vad s označením dutiny, která se dále dělí na čtyři podskupiny: bubliny, bodliny, odvařeniny a staženiny. Přehled jednotlivých druhů vad je uveden v následující tab.č.7.

Tab.č.7: Seznam vad třídy: 400 Dutiny [1]

Skupina vad		Druh vady	
<i>Pořadové číslo</i>	<i>Název</i>	<i>Pořadové číslo</i>	<i>Název</i>
410	Bubliny	411	Bubliny způsobené kyslíkem
		412	Bubliny způsobené vodíkem
		413	Bubliny způsobené dusíkem
		414	Zahlcený plyn
		415	Sít'kovité bubliny

420	Bodliny		
430	Odvařeniny	431	Odvařeniny od formy, jádra
		432	Odvařeniny od chladítek a zalévaných předmětů
		433	Odvařeniny od vměstků
440	Staženiny	441	Otevřené staženiny
		442	Vnitřní, uzavřené staženiny
		443	Řediny
		444	Staženiny od jader nebo ostrých hran formy
		445	Povrchové propadliny
		446	Plynové staženiny

3.7.1 Bubliny

Bublinami se rozumí dutiny v odlitku, které mohou být otevřené, spojené s povrchem nebo uzavřené, vnitřní. Uzavřené bubliny mohou mít buď čistý, hladký povrch nebo povrch oxidovaný. Otevřené bubliny mají vždy povrch oxidovaný jako výsledek styku s atmosférou během chladnutí a tuhnutí odlitku. Tvar bublin je velmi rozmanitý, vyskytují se bubliny kulovitého až elipsovitého tvaru, ale také nepravidelného, protáhlého tvaru. V odlitku se bubliny mohou vyskytovat jednotlivě nebo v rozsáhlých shlucích v celém jeho objemu a to ve všech odlitcích odlitých z dané tavby.[1]

Podle původu rozdělujeme bubliny na endogenní a exogenní.

Endogenní bubliny vznikají z plynů obsažených v tekutém kovu, pokud tlak rozpuštěného plynu převýší odpory působící proti němu. *Endogenní uzavřené bubliny* mají obvykle kovově lesklý, neoxidovaný povrch stěn, případně může být povrch pokryt tenkým oxidickým povlakem. *Endogenní otevřené bubliny*, bubliny spojené s povrchem odlitku, mají povrch zoxidován, přičemž tloušťka oxidické vrstvy roste s teplotou a časem prodlevy při tepelném zpracování odlitku.

Exogenní bubliny vznikají při odlévání, jestliže tlak plynů v okolí odlitku převýší odpor, který mu klade tuhnoucí povrchová vrstva a plyny vniknou do odlitku.[1]

Podle příčiny vzniku se bubliny dále dělí na bubliny způsobené kyslíkem, bubliny způsobené vodíkem a bubliny způsobené dusíkem. Uvedené typy bublin mají společnou

základní příčinu spočívající v tom, že během odlévání a chladnutí kovu se následkem teploty snižuje rozpustnost plynu v tekutém kovu a při překročení mezní rozpustnosti závislé na teplotě, tlaku a chemickém složení litiny, se tyto plyny vylučují ve formě bublin.[1]

Pro přesné zjištění příčiny vzniku této vady je vhodné provést analýzu povrchu vady řádkovacím elektronovým mikroskopem (REM) a mikrosondou.[33]

3.7.2 Bodliny

Bodliny jsou malé, protáhlé dutiny s hladkým povrchem, vytvořené těsně pod povrchem odlitku, které vyúsťují na povrch malými, jakoby kapilárními otvory. Průměr bodlin je okolo 1-2 mm, jejich délka je orientována kolmo k povrchu odlitku a může několikanásobně převýšit průměr. Vnitřní povrch bodliny je pokryt oxidickými vrstvami. Impulsem pro vznik bodlin jsou plyny - kyslík a vodík, které přecházejí z disociované vodní páry z formy do odlitku. Není-li v tekutém kovu potřebný přebytek dezoxidujícího prvku, který by likvidoval přísun kyslíku z vlhké formy, vzniká oxid uhelnatý, který se pro svou nízkou rozpustnost ve slitinách železa vyloučí ve formě bodlin, do nichž může difundovat vodík a dusík. Bodliny se dobře zviditelní tepelným opracováním a otryskáním odlitků. Výskyt bodlin byl prokázán zejména u ocelových odlitků, u litinových odlitků se bodliny vyskytují jen ojediněle. [1]

Výskytu bodlin u litinových odlitků je věnována řada prací [27,28,29,30,34,35], neboť stále není zcela jednoznačně objasněn mechanismus vzniku této vady. Dle literatury [34,36] mohou mít vliv na vznik bodlin u litinových odlitků nejen plyny (vodík, dusík a kyslík), ale také titan a hliník.

3.7.3 Odvařeniny

Obecně můžeme odvařeniny charakterizovat, dle literatury [1], jako povrchové, otevřené nebo uzavřené dutiny. Příčinou jejich vzniku je vývin velkého množství plynů a par po nalití tekutého kovu do formy, které nemohou, v případě špatně prodyšné nebo neprodyšné formy či jádra, znečištěného chladítka, případně vměstku, uniknout z místa svého vzniku a plyny tak pronikají do krystalizujícího odlitku.

Podle místa a příčiny vzniku rozlišujeme tři druhy této vady - odvařeniny od formy, jádra; odvařeniny od chladítek a zalévaných předmětů a odvařeniny od vměstků. Přesný popis vad, příčin jejich vzniku a opatření k zabránění vzniku těchto vad je uveden v literatuře [1].

3.7.4 Staženiny

Staženiny jsou výsledkem fyzikálního procesu zmenšení objemu kovu při jeho tuhnutí a za slévářenskou vadu je považujeme pouze tehdy, pokud odlitek nebyl v průběhu svého tuhnutí dostatečně objemově zásoben tekutým kovem.

Podle místa výskytu a velikosti rozeznáváme šest druhů této vady, jejichž přesný popis, včetně příčin jejich vzniku a opatření k zabránění vzniku těchto vad je uveden v literatuře [1].

4. Tavení litin

Tavení – pod tímto pojmem si můžeme, v obecné rovině, představit proces roztavení pevné vsázky ve vhodném tavícím zařízení na tekutý kov. V metalurgii se pak pod pojmem tavení ukrývá komplexní fyzikálně-chemický proces, jehož výsledkem jsou na straně jedné tekutý kov požadované kvality (chemické složení, teplota) a na straně druhé vedlejší produkty tavení (struska, plynné exhalace). Tavení litiny je proto důležitým úsekem v celém cyklu výroby odlitků a do značné míry na něm závisí úspěch práce sléváren. Úkolem obsluhy pecí je tedy zajistit při co nejnižších ztrátách (propal prvků) výrobu tekutého kovu předepsaného chemického složení, s požadovaným přehřátím a s co nejmenším obsahem plynů, vměstků a škodlivých příměsí [37].

Výroba slévářenských slitin v současné době využívá, vzhledem ke zvyšujícím se požadavkům na kvalitu tekutého kovu, hospodárnost a ekologii celého procesu výroby odlitků, poměrně širokou škálu tavících zařízení – pece šachtové (tzv. kuplovny), plamenné

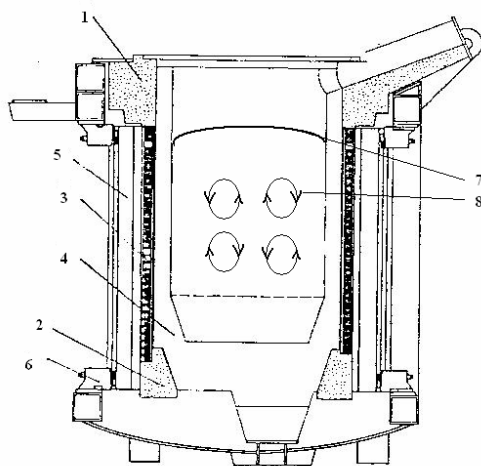
a elektrické (odporové, obloukové a indukční). Každé z výše jmenovaných zařízení má své klady i zápory a proto i specifické využití.

Ve své práci jsem se zaměřila na tavení litin ve dvou zcela odlišných výrobních zařízeních (z hlediska principu tavení) – a to na tavení litin v elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecích (IPSF) a bubnových rotačních plynových pecích (BRPP).

4.1 Elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece

Zavedení elektrických pecí do metalurgických provozů si vyžádaly zejména trvale se zvyšující nároky na kvalitu tekutého kovu, pružnost výroby, snižování nákladů a v neposlední řadě i ochranu životního prostředí. Ve slévárenských provozech se uplatnily zejména díky svému snadnému řízení provozu, rovnoměrné jakosti tekutého kovu a nízkým emisím znečišťujících látek, elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece.

Elektrická indukční středofrekvenční kelímková pec (IPSF) je tavicí zařízení kruhového průřezu se žárovzdorným kelímkem (např. grafitovým, šamotovým) s obsahem od několika desítek kilogramů do 10 tun. Řez středofrekvenční indukční kelímkovou pecí je zobrazen na obr.č.8 [38].



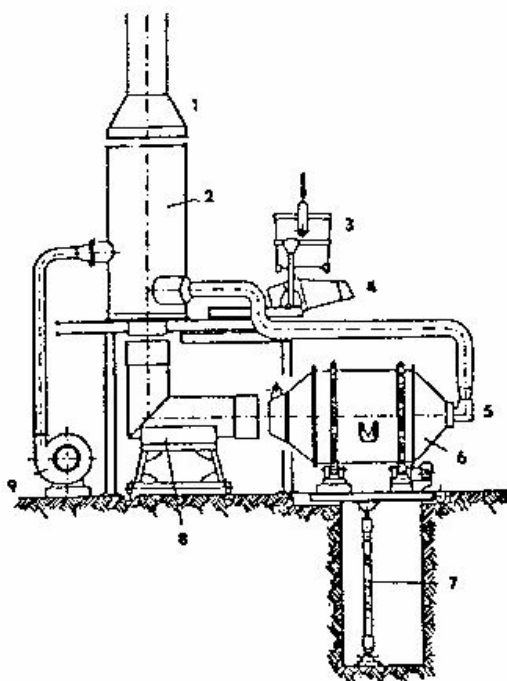
Obr.č.8: Řez IPSF

1,2-betonové prstence, 3-cívka,
4-kelímk, 5-svazek plechů, 6- uchycení
svazků, 7-kupolovitá hladina
taveniny, 8-pohyb taveniny

Pro tavení vsazeného materiálu je využíváno teplo, které vzniká působením vířivých proudů vybuzených elektromagnetickým polem, jehož zdrojem je cívka. V průběhu tavby dochází pomocí těchto vířivých proudů k chemické a teplotní homogenizaci tekutého kovu. Vlastní chemické složení taveného materiálu se během tavby mění jen málo, propal legovacích prvků je minimální (C, Si a Mn > 0,1%). Struska má většinou kyselý charakter a její množství se pohybuje okolo 1%.

4.2 Plynové rotační bubnové pece

Používání bubnových rotačních plynových pecí (BRPP) ve slévárenské výrobě se stává opět velmi aktuální záležitostí díky jejich neustálému technickému vývoji.



Obr.č.9: Schematické znázornění BRPP

1-komín, 2-rekuperátor, 3-zavážecí okov, 4-
zavážecí zařízení, 5-hořák,

6- buben pece, 7-hydraulický motor,

8-vozik odtahu, 9-dmychadlo

Bubnová rotační plynová pec je tavicí zařízení kruhového průřezu s obsahem od 1 do 20 tun. Schématické znázornění bubnové rotační plynové pece je uvedeno na obr.č.9 [39].

Tavení litin v těchto pecích odpovídá tavení v plamenných pecích. Zdrojem tepla pro roztavení vsázky a přehřátí taveniny je plamen, který vzniká v hořáku smíšením plyného paliva s kyslíkem [39]. Buben pece v průběhu tavení kontinuálně rotuje, čímž dochází k teplotní a chemické homogenizaci tekutého kovu. Oproti tavení v IPSF dochází k vysokému propalu prvků: C 10-35%, Si 18-25% a Mn 25-30%. Struska má kyselý charakter a její množství se pohybuje v rozmezí od 1,5 do 2,5 % [40].

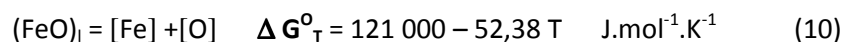
4.3 Chemické a termodynamické podmínky tavení

V průběhu tavení, mimopecního zpracování a tuhnutí litiny dochází k celé řadě chemických reakcí, které výrazným způsobem ovlivňují její kvalitu. Ve své práci jsem se zaměřila zejména na reakce kyslíku s dalšími prvky (např. C, Si, Al, Ca, Mn, Mg, Ba, Sr, La), kdy o průběhu dané reakce rozhoduje zejména jejich koncentrace v roztavené litině. Vzhledem ke skutečnosti, že obsah uhlíku a křemíku je oproti ostatním výše jmenovaným prvkům desetinásobně vyšší, považuji tyto reakce mezi kyslíkem, uhlíkem a křemíkem za nejdůležitější. Obsah hliníku se pohybuje v tisícinách procent a reakce mezi kyslíkem a hliníkem považuji za významné zejména z hlediska dezoxidace tekutého kovu.

O skutečnosti, jakým směrem bude, při zvolené teplotě a tlaku, daná chemická reakce probíhat, nám vypovídá hodnota volné entalpie (Gibbsovy energie) - ΔG^0 . Pokud bude hodnota volné entalpie záporná, bude daná chemická reakce probíhat v žádaném směru, neboť čím zápornější hodnota volné entalpie, tím je větší afinita kovu k příslušnému prvku. Výjimkou je pouze chemická reakce, při níž vzniká oxid uhelnatý, kdy změna hodnoty volné entalpie s rostoucí teplotou klesá (uhlík při dostatečně vysokých teplotách redukuje všechny ostatní kovy)[7]. Pokud bude hodnota volné entalpie kladná, bude daná chemická reakce probíhat samovolně v opačném směru.

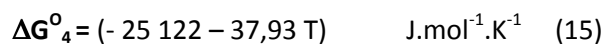
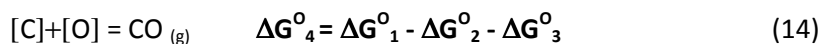
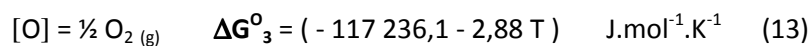
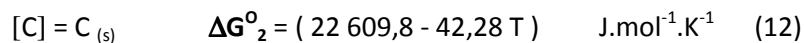
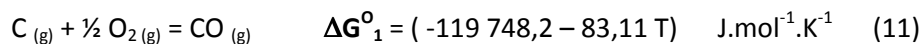
4.3.1 Reakce mezi železem a kyslíkem

Reakce rozkladu oxidu železnatého na železo a kyslík lze, dle literatury [41] popsat následovně:



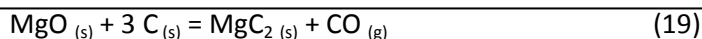
4.3.2 Reakce mezi uhlíkem a kyslíkem

Reakce mezi uhlíkem a kyslíkem za vzniku plynného oxidu uhelnatého lze, dle literatury [41], popsat následovně:



4.3.3 Reakce mezi uhlíkem a hořčíkem

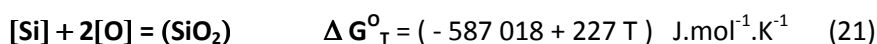
Reakce mezi uhlíkem a hořčíkem, za vzniku plynného oxidu uhelnatého lze, dle literatury [41], popsat následovně:



$$\Delta G^0 = (561\,200 - 189,77 T) \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (20)$$

4.3.4 Reakce mezi křemíkem a kyslíkem

Reakci mezi křemíkem a kyslíkem za vzniku oxidu křemičitého lze, dle literatury [41] a [42], popsat následovně



Hodnotu rovnovážné konstanty K_R výše uvedené reakce, při hodnotě plynové konstanty $R = 8,31441 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, lze stanovit na základě rovnice (22):

$$\log K_R = \log \left[\frac{a_{(\text{SiO}_2)}}{a_{[\text{Si}]} \cdot a_{(\text{O})}^2} \right] = \left(\frac{30\,645}{T} - 11,85 \right) \quad (22)$$

kde : K_R ... rovnovážná konstanta reakce /1/

$$a_{(\text{SiO}_2)} = 1$$

$$a_{(\text{O})} \dots \dots \text{obsah kyslíku } \text{ \%/}$$

$a_{[Si]}$ obsah křemíku /%/

T ... teplota taveniny /K/

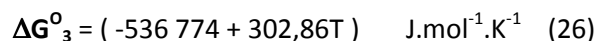
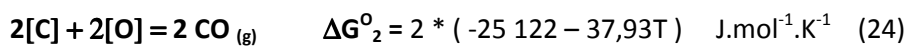
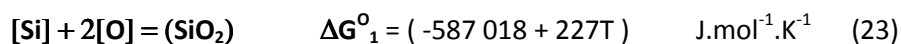
Výše uvedená reakce mezi křemíkem a kyslíkem je důležitá zejména z hlediska heterogenního zárodkování grafitu, neboť sloučenina SiO_2 má stejný typ krystalografické mřížky jako grafit (viz. tab.č.8).

Tab.č.8– Porovnání mřížkových parametrů

Chemická látka	Parametry	
	a	c
SiO_2	5,01	5,47
Grafit	2,46	6,79

4.3.5 Reakce mezi křemíkem a uhlíkem

Reakce mezi křemíkem, který do reakce vstupuje ve formě oxidu křemičitého a uhlíkem lze, dle literatury [41] a [42], popsat následovně:



Výše uvedené reakce popisují vliv uhlíku na tvorbu oxidu uhelnatého a redukci oxidu křemičitého v roztavené litině.

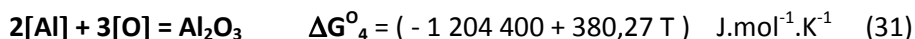
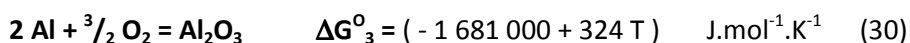
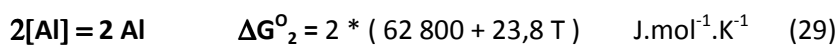
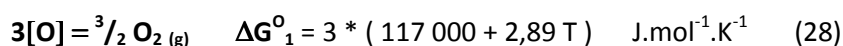
Hodnotu rovnovážné konstanty K_{Rco} reakce mezi SiO_2 a uhlíkem, při hodnotě plynové konstanty $R = 8,31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, lze stanovit na základě rovnice (27).

$$\log K_{\text{Rco}} = \log \left[\frac{a_{\text{Si}} \cdot (p_{\text{co}})^2}{a_{(\text{SiO}_2)} \cdot (a_{\text{C}})^2} \right] = \left(\frac{-28\,074}{T} \right) + 15,85 \quad (27)$$

kde : K_{Rco} ... rovnovážná konstanta CO /1/ $a_{(\text{SiO}_2)} = 1$
 a_{Si} obsah křemíku /%/ a_{C} obsah uhlíku /%/
 p_{co} parciální tlak CO /atm/ T ... teplota taveniny /K/

4.3.6 Reakce mezi hliníkem a kyslíkem

Reakci mezi hliníkem a kyslíkem lze, dle literatury [41], popsat následovně:



Výše uvedené reakce popisují vznik pevného oxidu hlinitého jako produktu desoxidace tekutého kovu, který vyplouvá do strusky.

Hodnotu rovnovážné konstanty K_R výše uvedené reakce, při hodnotě plynové konstanty $R = 8,31441 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, lze stanovit na základě rovnice (32), [19].

$$\log K_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \log ([\text{Al}]^2 * [\text{O}]^3) = \left(\frac{62\,860}{T} - 19,84 \right) \quad (32)$$

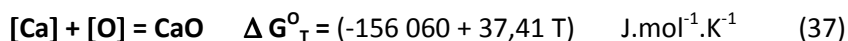
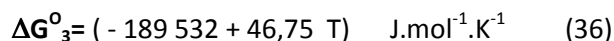
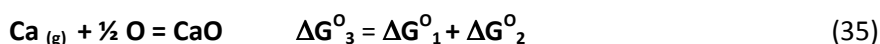
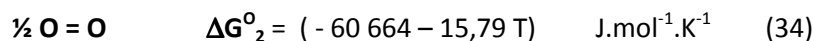
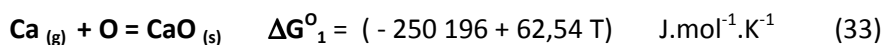
kde: $K_{\text{Al}_2\text{O}_3}$... rovnovážná konstanta /1/

Al ... obsah hliníku /%/

O obsah kyslíku /%/

4.3.7 Reakce mezi vápníkem a kyslíkem

Reakce mezi vápníkem a kyslíkem, za vzniku pevného oxidu vápenatého lze, dle literatury [43], popsat následovně:



Hodnotu rovnovážné konstanty K_R výše uvedené reakce, při hodnotě plynové konstanty $R = 8,31441 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, lze stanovit na základě rovnice (37).

30 046

$$\log K_{\text{CaO}} = \log ([\text{Ca}][\text{O}]) = \frac{\pm 6,0}{T} \quad (38)$$

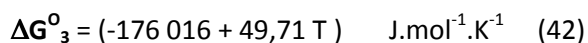
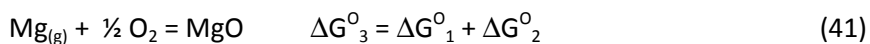
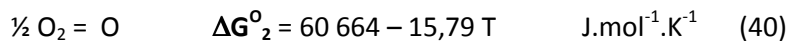
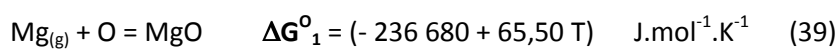
kde: **Ca** obsah vápníku /%/

O obsah kyslíku /%/

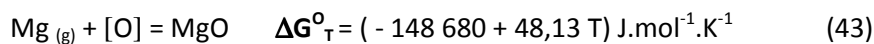
K_{CaO} ... rovnovážná konstanta /1/

4.3.8 Reakce mezi hořčíkem a kyslíkem

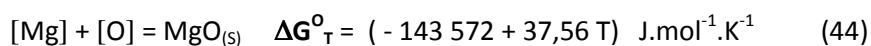
Reakce mezi hořčíkem a kyslíkem, za vzniku oxidu hořečnatého lze, dle literatury [43], popsat následovně:



Dle jiných literárních pramenů je možné reakci mezi hořčíkem a kyslíkem, za vzniku oxidu hořečnatého popsat následovně:

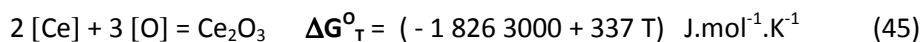


a



4.3.9 Reakce mezi cerem a kyslíkem

Reakci mezi cerem a kyslíkem, za vzniku oxidu ceritého, pro rozmezí teplot 1527 – 1721 °C (1800 – 2000 K), lze, dle literatury [41,43], popsat následovně:



Hodnotu rovnovážné konstanty K_R výše uvedené reakce, při hodnotě plynové konstanty $R = 8,31441 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, lze stanovit na základě rovnice (46).

$$\log K_{\text{Ce}_2\text{O}_3} = \log ([\text{Ce}]^2[\text{O}]^3) = \frac{-81100}{T} + 26,4 \quad (46)$$

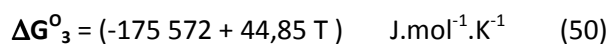
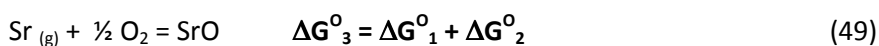
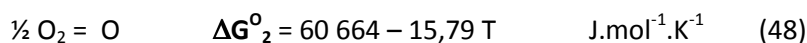
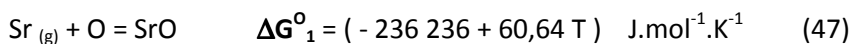
kde: $K_{\text{Ce}_2\text{O}_3}$... rovnovážná konstanta /1/

Ce obsah ceru /%/

O obsah kyslíku /%/

4.3.10 Reakce mezi stronciem a kyslíkem

Reakce mezi stronciem a kyslíkem, lze, dle literatury [43], popsat následovně:

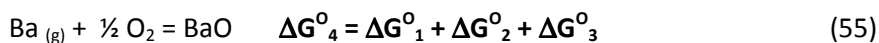
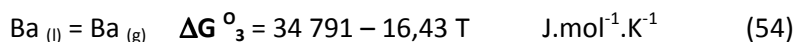
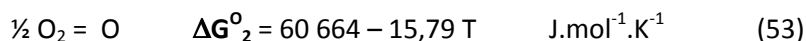
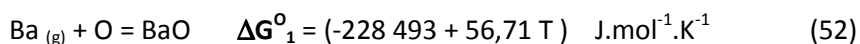


Hodnota Gibbosovy energie rovnice (ΔG^0_3) platí pouze v rozmezí teplot 1227 – 1727 °C (1500-2000 K). V rozmezí teplot 1367-2417°C (1640-2690 K) je nutné pro určení hodnoty Gibbosovy energie použít vztah:

$$\Delta G^0_T = (-172\,510 + 43,05\,T) \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (51)$$

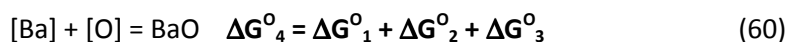
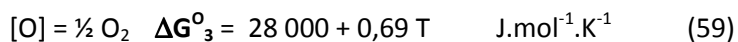
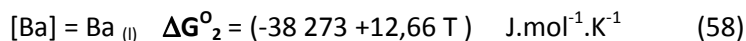
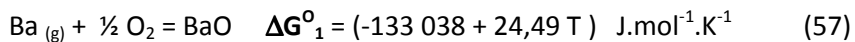
4.3.11 Reakce mezi bariem a kyslíkem

Reakci mezi bariem a kyslíkem, za vzniku oxidu barnatého lze, dle literatury [43], popsat následovně:



$$\Delta G^0_4 = (-133\,038 + 24,49\,T) \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (56)$$

Hodnota Gibbosovy energie rovnice (56) platí pouze v rozmezí teplot 1227 – 1727 °C (1500-2000 K). V rozmezí teplot 1536-1727°C (1809-2000 K) je nutné pro určení hodnoty Gibbosovy energie použít vztah:



$$\Delta G_4^0 = (-143\,311 + 37,84 T) \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (61)$$

4.4 Fyzikální podmínky tavení

4.4.1 Teplotní podmínky

Tavení litin v elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecích a v rotačních bubnových plynových pecích můžeme, z hlediska průběhu teplot, rozdělit do tří fází. V první fázi – fázi tavení vsázky - dochází k postupnému zvyšování teploty až na teplotu, při níž je veškerý vsazený materiál roztaven. Délka této první fáze tavení je pro každou tavbu jiná a závisí na specifických podmínkách a potřebách daného slévárenského provozu (např. na příkonu tepla, povaze vsázky...). Za druhou fázi tavení můžeme označit období, kdy je tavenina v tavícím zařízení držena na určité teplotě tavení, při níž dochází k hlavnímu odstranění doprovodných prvků a plynů z taveniny, a tekutý kov tak získává

požadované chemické složení. Tato druhá fáze bývá označována jako oxidační období. Třetí fáze tavení je charakterizována jako období, kdy je tekutý kov požadovaného chemického složení, držen na určité teplotě, o několik stupňů celsia nižší, než byla teplota tavení a připraven k vylití z tavícího zařízení do transportní pánve.

Z hlediska průběhu chemických reakcí považuji za nejdůležitější hodnotu teploty rovnováhy a teploty počátku uhlíkového varu. Teplota rovnováhy představuje teplotu, při níž v určité chemické soustavě již nebude daná chemická reakce probíhat. Z rovnice (27), která slouží pro výpočet konstanty rovnováhy reakce mezi oxidem křemičitým a uhlíkem, ($a_{\text{SiO}_2} = 1$), můžeme určit teplotu rovnováhy – t_R [4,20].

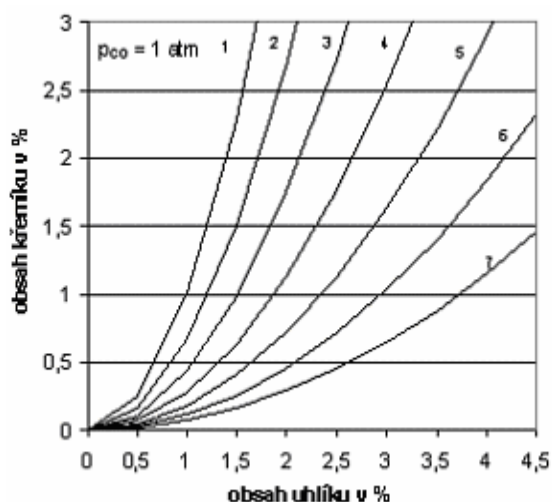
$$t_R = \frac{-28\,074}{[\% \text{ Si}]} - 278 \text{ } /^{\circ}\text{C}/ \quad (62)$$

$$\{ \log (\frac{1}{p_{\text{CO}}^2}) \} - 15,84$$

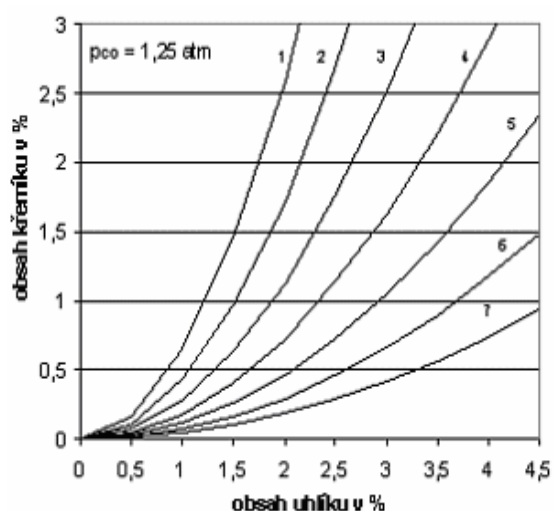
$$[\% \text{ C}]^2$$

kde : t_R ... rovnovážná teplota $/^{\circ}\text{C}/$ $\% \text{ Si}$... obsah křemíku $/\%/$
 p_{CO} ... hodnota parciálního tlaku CO $/\text{atm}/$ $\% \text{ C}$... obsah uhlíku $/\%/$

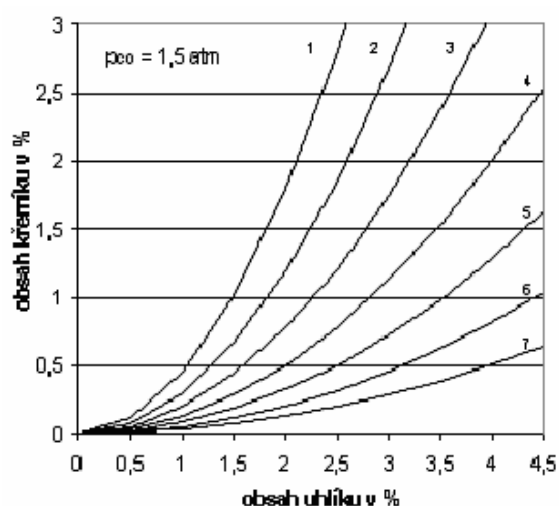
Závislost hodnoty teploty rovnováhy na chemickém složení, konkrétně na obsahu uhlíku a křemíku a hodnotě parciálního tlaku CO jsou uvedeny na obrázku č.10a-d.



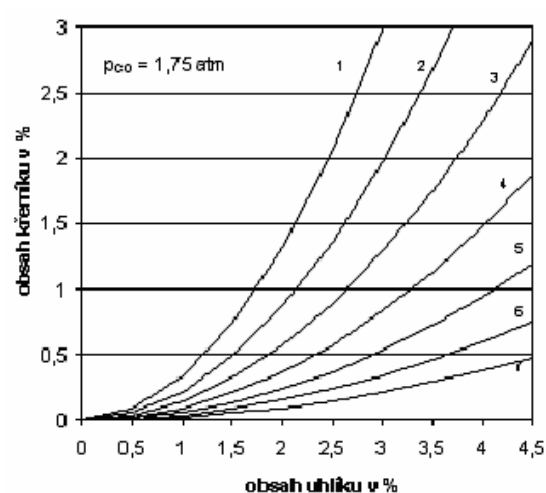
Obr.č.10a – Závislost rovnovážných teplot na obsahu C a Si při $p_{CO} = 1 \text{ atm}$



Obr.č.10b – Závislost rovnovážných teplot na obsahu C a Si při $p_{CO} = 1,25 \text{ atm}$



Obr.č.10c – Závislost rovnovážných teplot na obsahu C a Si při $p_{CO} = 1,5 \text{ atm}$



Obr.č.10d – Závislost rovnovážných teplot na obsahu C a Si při $p_{CO} = 1,75 \text{ atm}$

Na obr. 10a-d jsou na vodorovných osách znázorněny obsahy uhlíku v %, na svislých osách obsahy křemíku v %, v levém horním rohu každého obrázku je uvedena hodnota parciálního tlaku oxidu uhelnatého, čísla 1 – 7 u jednotlivých křivek představují hodnoty rovnovážné teploty (1=1500°C, 2=1480°C, 3=1460°C, 4=1440°C, 5=1420°C, 6=1400°C, 7=1380°C).

Teplota počátku uhlíkového varu představuje minimální hodnotu teploty, kterou je nutné dosáhnout pro dezoxidaci litiny uhlíkovým varem. Pro chemickou reakci mezi oxidem křemičitým a uhlíkem (27), za vzniku plynného oxidu

uhelnatého, získáme hodnotu teploty počátku uhlíkového varu výpočtem z empirického vztahu (63), uvedeném v literatuře [4,20].

$$t_{PUV} = (0,7866 * t_R) + 362 \quad /^{\circ}\text{C}/ \quad (63)$$

kde : t_{PUV} ... teplota počátku uhlíkového varu $/^{\circ}\text{C}/$

t_R ... rovnovážná teplota $/^{\circ}\text{C}/$

4.4.2 Tlakové podmínky

V průběhu tavení dochází na základě reakce mezi oxidem křemičitým a uhlíkem ke vzniku plynného oxidu uhelnatého (viz.kap.4.3.5), který v případě nevytvoření optimálních tlakových podmínek zůstává v tavenině a může se tak stát iniciátorem vzniku endogenních bublin.

Hodnotu parciálního tlaku oxidu uhelnatého, který vzniká pouze tehdy, pokud reakce mezi oxidem křemičitým a uhlíkem $(\text{SiO}_2) + 2[\text{C}] = [\text{Si}] + 2\text{CO}$ probíhá směrem doprava, lze získat výpočtem z rovnice (64).

$$p_{CO} = \sqrt{K_{Rco} * \frac{[\%C]^2}{[\%Si]}} \quad /atm/ \quad (64)$$

kde : p_{CO} ... hodnota parciálního tlaku CO $/atm/$ $\%C$... obsah uhlíku $/\%/$

K_{Pco} ... rovnovážná konstanta $/1/$ $\% Si$... obsah křemíku $/\%/$

Hodnotu parciálního tlaku oxidu uhelnatého (63), získanou pro danou teplotu taveniny a chemické složení (obsah uhlíku a křemíku), porovnáme s hodnotou součtu tlaku atmosferického a metalostatického, přičemž hodnota metalostatického tlaku je dána výškou hladiny roztavené litiny v kelímkové peci a hustotou taveniny (65). Vzhledem ke skutečnosti, že chemické reakce neprobíhají v celém objemu kelímku

stejněměrně (intenzivněji probíhají chemické reakce na hladině tekutého kovu, méně intenzivně u dna kelímku), používáme při výpočtu metalostatického tlaku jeho průměrnou hodnotu.

$$p_{M+A} = \frac{h \cdot \rho \cdot g}{2} + p_{ATM} \quad /atm/ \quad (65)$$

kde: p_{M+A} ... součet metalostatického a atmosférického tlaku /atm/

p_{ATM} ... hodnota atmosférického tlaku /atm/

h ... výška kelímku pece /cm/

ρ ... hustota tekutého kovu pro dané chemické složení /g.cm⁻³/

g ... tíhové zrychlení zemské /cm.s⁻² /

Pro vyplouvání bublin plynného oxidu uhelnatého, vznikajícího jako produkt reakce mezi oxidem křemičitým a uhlíkem je nutné, aby hodnota tlaku oxidu uhelnatého (64) byla vyšší, než hodnota součtu tlaku atmosférického a metalostatického (65).

Tyto výše uvedené poznatky rozhodují o tom, zda při vytvoření podmínek pro průběh uhlíkového varu dojde ke snížení obsahu kyslíku v tavenině.

4.4.3 Časové podmínky

Přetavení kovové vsázky v elektrických indukčních středofrekvenčních pecích a v rotačních bubnových plynových pecích probíhá, např. oproti tavení v kupolních pecích, při vyšších teplotách, které v kombinaci s chemickým složením taveniny a tlakovými podmínkami při tavení mohou vést, při překročení limitní

hranice, ke vzniku některých slévárenských vad (např. endogenních bublin). Proto je nutné sledovat také časový průběh tavení.

Souvislost mezi teplotním a časovým průběhem tavení udává vztah (66), dle literatury [4,20].

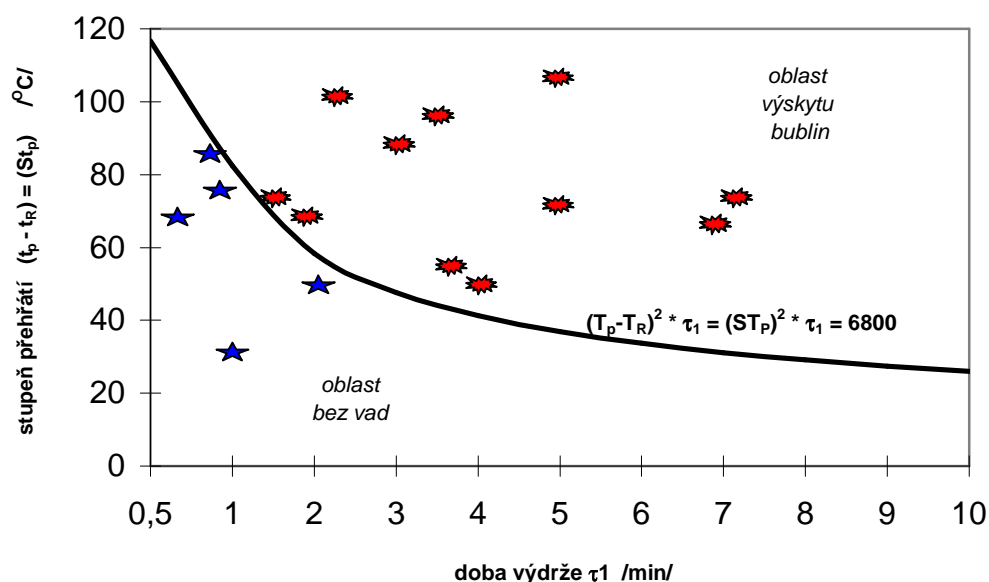
$$(t_T - t_R)^2 * \tau_1 = (St_p^1)^2 * \tau_1 \leq 6\,800 \quad (66)$$

kde : t_T ... teplota taveniny /°C/ τ_1 ... doba výdrže /min/

t_R ... rovnovážná teplota /°C/ St_p^1 ... stupeň přehřátí /°C/

6800 = (82)² ... horní limitující hodnota stupně přehřátí /°C/

Graficky je vztah (66) zobrazen na obr.č.11.



Obr.č.11: Závislost mezi dobou výdrže a stupněm přehřátí litiny v peci

Závislost zobrazená na obr.č.11 má exponenciální charakter. Na vodorovné ose je doba výdrže τ_1 v minutách, na svislé ose je stupeň přehřátí v stupních Celsia. Hodnoty nacházející se nad danou křivkou jsou hodnoty, při nichž se v litině nachází více celkového rozpuštěného kyslíku, který je příčinou vzniku endogenních bublin.

V případě, že hodnota na levé straně vztahu (66) bude vyšší než 6800, bude nutné pro vyvarování se výskytu endogenních bublin buď:

1) zkrátit dobu výdrže (τ_1) na daném stupni přehřátí (St_p^{-1})

nebo 2) snížit stupeň přehřátí (St_p^{-1}) pro danou dobu výdrže (τ_1)

případně použít kombinaci obou výše uvedených metod (tzn. snížit stupeň přehřátí (St_p^{-1}) a zkrátit dobu výdrže (τ_1)) .

5. Dezoxidace litin

Účelem procesu dezoxidace (odkysličení) je snížení obsahu kyslíku a jeho sloučenin na takovou hodnotu, při níž by již nevznikalo nebezpečí vzniku vad způsobených tímto prvkem.

V metalurgii litin je možné provádět dezoxidaci dvěma po sobě následujícími procesy. Prvním procesem je proces tavení a druhým procesem je mimopecní zpracování litiny (modifikace, očkování). Při tavení litin může dojít vlivem vyšší relativní vlhkosti ovzduší ve slévárně, použití nekvalitní vsázky (vsázka vlhká, zaolejovaná, rezivělá...), případně při překročení limitní hranice teplotního, tlakového a časového průběhu tavení, k vyššímu sycení taveniny kyslíkem, který může být iniciátorem vzniku některých slévárenských vad – např. bublinatosti u odlitků.

Pro snížení zvýšeného obsahu kyslíku v tekutém kovu je proto nutné provést jeho dezoxidaci, tzn. převést přebytečný - aktivní kyslík na neaktivní. K dezoxidaci používáme prvky, které se vyznačují vysokou afinitou ke kyslíku (např. Ca, Mn, Si, Al...), přičemž je třeba dodržet zásadu minimálního znečištění tekutého kovu

dezoxidačními produkty, tzn. že požadujeme, aby produkty dezoxidace v co největší míře přecházely do plynné atmosféry nebo do strusky.

5.1 Dezoxidace litin v průběhu tavení

Ke snížení obsahu kyslíku v tekutém kovu v průběhu tavení dochází :

- 1) vlivem přítomnosti křemíku v tavenině, který reaguje s kyslíkem za vzniku oxidu křemičitého (viz.kapitola 4.3.4)
- 2) a následně potom reakcí mezi oxidem křemičitým a uhlíkem (viz. kapitola 4.3.5), za vzniku plynného oxidu uhelnatého, který v případě optimálních tlakových podmínek vyplouvá z taveniny do plynné atmosféry.

Pro dezoxidaci taveniny vlivem reakce mezi oxidem křemičitým a uhlíkem je nutné vytvořit podmínky pro vznik uhlíkového varu – tzn. stanovit teplotu počátku uhlíkového varu a dobu výdrže na dané teplotě.

Hodnotu teploty počátku uhlíkového varu získáme výpočtem dle vztahu (63) uvedeném v kapitole 4.4.1 *Teplotní podmínky*.

Dobu výdrže na teplotě, při níž probíhá uhlíkový var, je možné určit ze vztahu (67), dle literatury [4,20].

$$\tau_2 \leq \frac{(((St_p^1)^2 * \tau_1) - 6800) / 218}{(St_p^2)} \quad (67)$$

kde : τ_2 ... doba výdrže v oblasti uhlíkového varu /min/

$St_p^1 = (t_T - t_R)$... stupeň přehřátí v pánvi /°C /

τ_1 ... doba výdrže /min/

$$\mathbf{St_p}^2 = (t_{pUV} - t_T) \dots \text{stupeň přehřátí pro oblast varu } /^{\circ}\text{C}/$$

5.2 Dezoxidace litin mimopecním zpracováním

Při vysokém obsahu celkového kyslíku v tekutém kovu je výhodné jako dezoxidační přípravek použít hliník, který má vliv nejen na snížení obsahu kyslíku v litině, ale zároveň pozitivně ovlivňuje zárodkování grafitu tvorbou nitridu hliníku (AlN). Současně je nutné mít na paměti zásadu, že koncentrace hliníku v tekutém kovu by neměla překročit rovnovážný stav k obsahu kyslíku.

Množství hliníku, které je možné přidat do taveniny, lze určit jako rozdíl mezi minimální (maximální) a skutečnou hodnotou obsahu hliníku v tavenině. Skutečné množství hliníku v litině získáme výpočtem dle vzorce (68).

$$AI_{celk} = AI_{tav} + AI_{ock} + AI_{mod} \quad \text{/\%/} \quad (68)$$

kde: Al_{celk} ... celkový obsah hliníku v tekutém kovu před litím do forem %/

Al_{lav} ... obsah hliníku v tekutém kovu v IPSF /%/

Al_{očk} ... množství hliníku v očkovadle /%/

Al_{mod} ... množství hliníku v modifikátoru /%/

Minimální a maximální množství hliníku pro daný obsah celkového kyslíku ve formě oxidů (Oox) stanovíme na základě vztahů (69) a (70), uvedených v literatuře [21,44]. Grafické znázornění těchto vztahů je na obr.č.12.

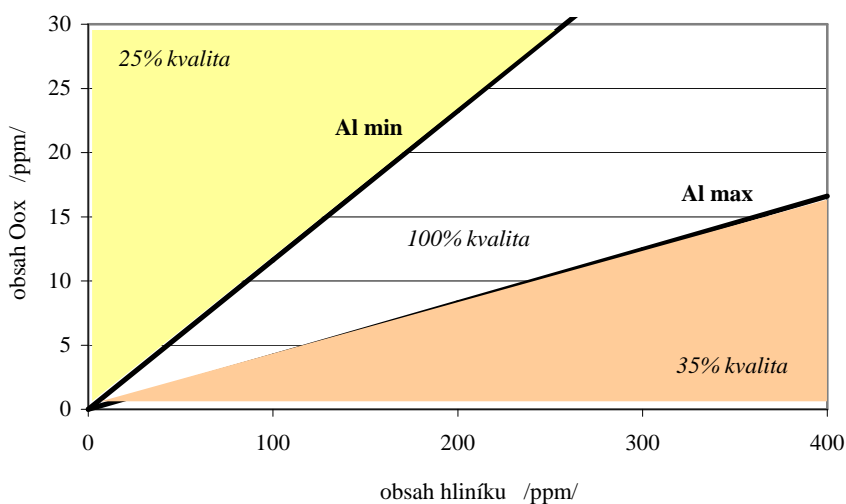
$$\mathbf{Al}_{\text{MIN}} = 8,6 * \mathbf{O}_{\text{OX}} \quad / \text{ppm}/ \quad (69)$$

$$AI_{MAX} = 24,1 * O_{OX} \quad /ppm/ \quad (70)$$

kde : Al_{MIN} ... minimální obsah hliníku v tavenině /ppm/

Al_{MAX} ... maximální obsah hliníku v tavenině /ppm/

O_{OX} ... obsah celkového kyslíku ve formě oxidů /ppm/



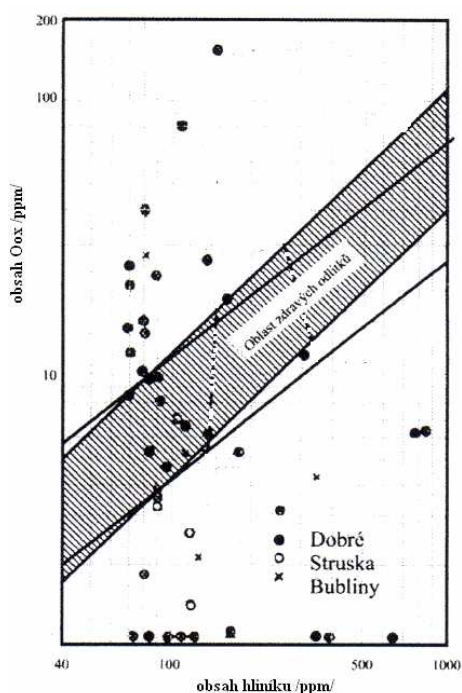
Obr.č.12: Vymezení oblastí pro dobrou metalurgickou kvalitu litiny
v závislosti na obsahu Oox a hliníku v tavenině

Na svislé ose výše uvedeného obrázku je znázorněn obsah celkového kyslíku (ve formě oxidů) v ppm a na vodorovné ose je celkový obsah hliníku v tavenině v ppm. S ohledem na možnost dezoxidace hliníkem jsou v obrázku vymezeny oblasti, kde oxidy značně převyšují obsah hliníku, tato oblast je definována jako 25% kvalita litiny. Při poklesu obsahu celkového kyslíku může nastat případ uvedený na obrázku vpravo dole – kdy pro dané množství vázaného kyslíku bude v tekutém kovu přebytek hliníku - oblast definována jako 35% kvalita litiny.

Kvalitu taveniny definujeme v tomto případě jako její schopnost vedoucí ke snížení tvorby zákalky, vzniku endogenních bublin a tvorby segregálně vyloučeného cementitu.

Optimální obsah hliníku na daný obsah oxidů v tavenině označuje střední oblast, popsaná jako 100% kvalita litiny a je vymezena tzv. minimálním a maximálním obsahem hliníku.

Pro stanovení kvality tekutého kovu, respektive posouzení vzájemného vztahu mezi celkovým obsahem kyslíku ve formě oxidů, hliníkem a výskytem bublin u litinových odlitků je možné využít také závislost zobrazenou na obr.č. 13 [22,23].



Na ose x je znázorněn celkový obsah kyslíku ve formě oxidů, na ose y hodnoty celkového obsahu hliníku v litině. Šrafovaná část ve střední části obrázku nám vyjadřuje tzv. oblast zdravých odlitků, tj. odlitků u kterých by se neměly vyskytnout slévárenské vady z titulu bublin.

Obsahu hliníku v tekutém kovu je v posledních letech v odborné literatuře [30,45,46,47] věnována značná pozornost a to zejména s ohledem na výskyt bodlin u litinových odlitků.

Obr.č.13: Vymezení oblastí pro
dobrou metalurgickou kvalitu litiny

V řadách odborné slévárenské veřejnosti není zcela jednotný názor na obsah hliníku v souvislosti s výskytem výše

jmenované vady. Dle Baiera a Köppena je pro výskyt bodlin nebezpečný obsah hliníku od 100 do 1000 ppm. Carter doporučuje pro potlačení této vady obsah hliníku pod 200 ppm. Katz prokázal jako rizikový obsah hliníku v rozmezí 100 až 1500 ppm. Hecht a Castelhana vymezili jako kritický obsah 200 až 1500 ppm hliníku, při obsahu hliníku od 1500 do 2000 ppm byl výskyt bodlin potlačen. Riposana potvrzuje, že obsah hliníku v rozmezí 50 až 100 ppm je zárukou omezení výskytu bodlin. Naik a Wallace uvádí, že při velmi nízkém obsahu hliníku (pod 0,01%) klesá výskyt bodlin, obsah hliníku v rozmezí 0,01 až 0,2 %

podporuje vznik bodlin a překročení hranice 0,2% hliníku opět omezuje výskyt bodlin.
[30,36]

6. Metodika měření

Na počátku řešení dané problematiky jsem zpracovala teoreticko-metodická východiska, po nichž následovala praktická část práce – byla prováděna měření ve slévárnách šedé a tvárné litiny na území České republiky.

Pro stanovení obsahu kyslíku a dusíku jsem zvolila metodu vysokoteplotní vakuové extrakce, která spočívá v tepelném rozkladu měřeného vzorku v grafitovém kelímku přístroje. Kyslík se v průběhu zahřívání vzorku uvolňuje ve formě oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Z plynné fáze je potom stanoven obsah chemicky vázaného kyslíku, který je označován jako O_{ox} - celkový obsah kyslíku ve formě oxidů. Dusík je uvolňován v molekulární formě. Obsah vodíku nebyl, z důvodu obtížnosti, měřen.

V současné době neexistuje metoda přímého stanovení obsahů plynů v litině a pro měření aktivity kyslíku jsem neměla k dispozici speciální senzory měření aktivity kyslíku a teploty v litině a proto jsem pro stanovení obsahu kyslíku a dusíku v tekutém kovu použila výše popsanou metodu vysokoteplotní vakuové extrakce.

Experimentální část práce byla prováděna ve třech etapách.

V první etapě jsem:

- prováděla odběr vzorků pro stanovení chemického složení a obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů (O_{ox}) a dusíku
- měřila teplotní a časový průběh vedení tavby a následného zpracování tekutého kovu (očkování, modifikace)

Chemické složení

Odběr vzorků pro určení chemického složení, zejména pro stanovení obsahu uhlíku, křemíku, hliníku, dusíku a O_{ox} jsem prováděla v následujících etapách:

- první vzorek pro stanovení výše uvedených prvků byl odebrán při nejvyšší dosažené teplotě tavení
- druhý vzorek byl odebrán těsně před vylitím tekutého kovu z tavicího agregátu do transportní (licí) pánve
- třetí vzorek byl odebrán po provedeném očkování, případně modifikaci na licím poli.

Při odběru jednotlivých vzorků jsem dbala o jejich homogenitu, tzn., že před každým odběrem byla pečlivě stažena z hladiny kovu struska. Vzorek pro stanovení obsahu uhlíku, křemíku a hliníku má klasický tvar – tzv. penízek. Vzorek pro stanovení obsahu O_{ox} a dusíku byl odebírán nasátím tekutého kovu do křemenné trubičky o vnitřním \varnothing 5mm.

Teplotní průběh tavení

Měření teplot, ve stupních Celsia, v průběhu celého výrobního procesu bylo prováděno ponorným pyrometrem a byly měřeny a zaznamenávány tyto teploty:

- nejvyšší dosažená teplota tavení
- teplota před vylitím tekutého kovu do transportní (licí) pánve
- teplota po provedeném mimopecním zpracování (očkování, modifikace)
- teplota kovu na licím poli.

Časový průběh tavení

Časové úseky mezi jednotlivými výrobními etapami jsem měřila stopkami a pro následné zpracování jsem zaznamenávala tyto doby:

- doba výdrže na nejvyšší dosažené teplotě tavení
- doba od dosažení nejvyšší teploty tavení po vylití tekutého kovu do transportní (licí) pánve
- doba od dosažení nejvyšší teploty tavení po počátek lití tekutého kovu do forem na licím poli.

V druhé etapě byly ve spolupráci s Katedrou analytické chemie stanoveny obsahy kyslíku a dusíku spektrometrickou analýzou, prováděnou na termo-evolučním analyzátoru LECO TC 436.

Analýzy vzorků pro určení chemického složení sledovaných taveb, tj. obsahu uhlíku, křemíku a hliníku, byly provedeny laboratořemi sléváren, v nichž probíhala jednotlivá měření.

Ve třetí etapě jsem na základě provedených spektrometrických analýz, teplotního, tlakového a časového průběhu tavení a mimopecního zpracování litiny prováděla, dle vztahů (62), (63), (64), (65) a (66) uvedených v kapitole 4. a vztahů (67), (69) a (70) uvedených v kapitole 5., vyhodnocení získaných dat. V programu MS EXCEL byl vytvořen jednoduchý výpočtový systém, který byl předán k využití také slévárnám, ve kterých probíhala měření, současně s hodnotícími zprávami sledovaných taveb s doporučením pro zlepšení kvality tekutého kovu.

Praktické použití vztahů (62), (63), (64), (65) a (66) uvedených v kapitole 4. a vztahů (67), (69) a (70) uvedených v kapitole 5. bylo uveřejněno ve Slévárenské ročence ® 2003 a 2004.

7. Dosažené výsledky

V rámci řešení mé práce bylo provedeno celkem 74 měření v 5 slévárnách, které pro výrobu litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem používají elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece (IPSF) o objemu od 1 do 4 tun, a 23 měření v jednom slévárenském provozu, který pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem a litiny s kuličkovým grafitem používá bubnové rotační plynové pece (BRPP) o objemu 3,5 a 8 tun.

Výsledky provedených měření jsou uvedeny v přílohách č.1-6. Pro snadnější orientaci a následné zpracování byla jednotlivá naměření označena takto:

- I...hodnoty naměřené při tavení v peci
- II...hodnoty naměřené po určité časové prodlevě
- III...hodnoty naměřené v udržovacím zařízení
- IV...hodnoty naměřené po provedeném očkování
- V...hodnoty naměřené po provedené modifikaci s následným očkováním
- VI...hodnoty naměřené u licí linky na počátku lití.

U některých měření se můžeme setkat pouze s jednou, případně dvěma naměřenými hodnotami (I,II) a to z důvodu, že prvotním záměrem bylo pouze sledování obsahu kyslíku při tavení v elektrických indukčních středofrekvenčních pecích. Tento záměr byl následně doplněn o odběr vzorků při mimopecním zpracování, kdy byl kromě obsahu kyslíku měřen také obsah dusíku. V závěru výzkumu byla provedena měření celého procesu výroby a zpracování tekutého kovu, tedy od natavení v tavícím zařízení, přes udržovací zařízení (pokud je v daném slévárenském provozu využíváno), přes mimopecní zpracování až po licí linku.

Zvolenou metodiku měření obsahu kyslíku a dusíku v elektrických indukčních středofrekvenčních pecích jsem použila i při měření obsahů výše uvedených plynů při výrobě tekutého kovu v bubnových rotačních plynových pecích.

Na základě provedených měření a vyhodnocení naměřených dat, můžeme tyto získané výsledky rozdělit do tří skupin. První skupina výsledků obsahuje hodnoty naměřených obsahů celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku v průběhu tavení a po mimopecním zpracování tekutého kovu v jednotlivých slévárenských provozech. Druhá skupina získaných dat nás informuje o teplotním, tlakovém a časovém průběhu tavení v IPSF a BRPP, jeho vlivu na obsah O_{OX} , dusíku a možnosti výskytu endogenních bublin. Třetí skupina výsledků nás informuje o výskytu slévárenských vad, zejména pak o výskytu endogenních bublin.

7.1 Naměřené obsahy celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku v jednotlivých slévárenských provozech

V této podkapitole jsou uvedeny průměrné naměřené obsahy O₂ a N₂ v jednotlivých fázích výroby a ve vyráběných druzích litin, současně se základní charakteristikou slévárenských provozů z hlediska technologie tavení, obsahu tavicího zařízení, druhu vyráběného materiálu, složení vsázky, používaného očkovačla a modifikátoru, způsobu modifikace, do jakého materiálu byl tekutý kov odléván a počtu provedených měření.

Z deskriptivních charakteristik statistického souboru byly pro vzájemné srovnání zvoleny tyto znaky: počet hodnot (n-počet hodnot v statistickém souboru), průměr (\bar{x} -součet všech hodnot souboru dělený jejich počtem), chyba průměru (ChP), medián (Me-prostřední hodnota uspořádaného statistického souboru), směrodatná odchylka (s_x -druhá odmocnina z rozptylu), minimum (min) a maximum (max). Statistické analýzy byly vytvořeny v programovém balíku SPSS 16.0 for Windows ® [50].

Obecně můžeme konstatovat, že ve všech slévárnách byl pro tavení litin použit běžný vsázkový materiál, jehož složení bylo dáno požadovaným složením roztavené litiny, které je určeno druhem vyráběné litiny (slévárenské surové železo, vratný materiál, zlomková litina, ocelový šrot). Pro proces očkování a modifikace s následným očkováním byly použity běžně používané přípravky.

7.1.1 Charakteristika sléváren využívající technologii elektrických indukčních středofrekvenčních pecí

Označení slévárenského provozu: **S1**

Technologie tavení: IPSF

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Obsah tavícího zařízení: 4t

Vyráběný materiál: **GJL, GJS**

Složení vsázky: 55% vrat, 15% zlomkovina, 25% ocelový šrot, 5% slév.sur.železo

Očkovadlo, modifikátor: 75% FeSi, Mg

Způsob modifikace: injektáž plněného profilu s Mg

Odlévání do forem: samotuhnoucí furanová směs

Celkový počet provedených měření: **10**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.1

Tab.č.9: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu ve slévárně S1

S1		Pořadí měření				Materiál	
		I	II	IV	V	GJL	GJS
Oox /ppm/	n	10	9	7	3	20	9
	Ø	22,60	67,11	35,29	52,33	25,80	38,33
	ChP	2,330	3,717	5,441	11,348	2,624	7,010
	Me	21,00	63,00	29,00	42,00	23,50	36,00
	s _x	7,367	11,152	14,396	19,655	11,737	21,030
	min	12	12	24	40	12	12
	max	36	67	64	75	64	75
	n	10	9	7	3	20	9
	Ø	61,30	67,11	64,29	72,00	63,05	69,11

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

N /ppm/	ChP	2,353	3,717	3,701	5,292	2,107	3,002
	Me	63,50	63,00	66,00	74,00	62,50	68,00
	s _x	7,439	11,152	9,793	9,165	9,423	9,006
	min	52	51	53	62	51	55
	max	72	83	77	80	83	83

Označení slévárenského provozu: **S2**

Technologie tavení: IPSF

Obsah tavícího zařízení: 4t

Vyráběný materiál: **GJL, GJS**

Složení vsázky: 40% vrat, 20% zlomkovina, 25% ocelový šrot, 15% slév.sur.železo

Očkovadlo, modifikátor: 75% FeSi, Mg

Způsob modifikace: v pánvi

Odlévání do forem: furanová směs, jednotná bentonitová směs

Celkový počet provedených měření: **20**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.2-A, č.2-B

Tab.č.10: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu ve slévárně S2

S2		Pořadí měření				Materiál	
		I	II	IV	V	GJL	GJS
	n	19	18	6	9	15	37
	Ø	29,47	35,22	32,00	30,11	25,73	34,35

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Oox /ppm/	ChP	3,777	6,160	7,836	12,849	4,671	4,348
	Me	30,00	26,00	30,50	15,00	20,00	30,00
	s _x	16,463	26,137	19,194	38,547	18,089	26,450
	min	10	3	8	6	3	6
	max	63	97	64	129	64	129
N /ppm/	n	19	18	6	8	15	36
	Ø	52,47	48,61	88,50	41,75	84,13	40,97
	ChP	4,926	4,407	8,891	0,648	4,774	0,905
	Me	38,00	42,00	96,00	42,00	86,00	40,00
	s _x	21,472	18,699	21,778	1,832	18,489	5,427
	min	36	28	45	39	40	28
	max	100	93	103	45	103	53

Označení slévárenského provozu: **S3**

Technologie tavení: IPSF

Obsah tavícího zařízení: 1t

Vyráběný materiál: **GJL**

Složení vsázky: 30% vrat, 30% ocelový šrot, 40% slév.sur.železo

Očkovadlo: 75% FeSi

Odlévání do forem: jednotná bentonitová směs

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Celkový počet provedených měření: **13**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.3

Tab.č.11: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu ve slévárně S3

S3		Pořadí měření			Materiál
		I	II	IV	GJL
Oox /ppm/	n	8	13	13	34
	Ø	20,63	15,08	23,92	19,76
	ChP	5,278	1,741	2,50	1,772
	Me	15,00	13,00	20,00	19,50
	s _x	14,928	6,278	12,251	10,334
	min	7	6	9	6
	max	50	25	40	50
N /ppm/	n	8	13	13	34
	Ø	99,50	97,77	94,38	96,88
	ChP	1,524	2,175	2,275	1,274
	Me	99,5	98,00	97,00	98,00
	s _x	4,309	7,844	8,201	7,430
	min	94	78	76	76
	max	108	106	108	108

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Označení slévárenského provozu: **S4**

Technologie tavení: IPSF

Obsah tavícího zařízení: 2t

Vyráběný materiál: **GJL, GJS**

Složení vsázky: 45% vrat, 40% ocelový šrot, 15% slév.sur.železo

Očkovadlo, modifikátor: 75% FeSi, Mg

Způsob modifikace: autokláv

Odlévání do forem: jednotná bentonitová směs

Celkový počet provedených měření: **21**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.4

Tab.č.12: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu ve slévárně S4

S4		Pořadí měření					Materiál
		I	II	III	IV	V	GJS
	n	14	18	4	8	6	50
	Ø	34,14	36,94	18,50	40,38	13,5	32,42

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Oox /ppm/	ChP	5,451	6,377	4,173	13,324	2,432	3,615
	Me	25,00	30,50	16,50	31,50	13,50	25,00
	s _x	20,396	27,057	8,347	37,686	5,958	25,563
	min	16	7	11	5	4	4
	max	83	121	30	120	21	124
N /ppm/	n	14	18	4	8	6	50
	Ø	121,07	120,61	108,25	101,38	89,50	112,94
	ChP	5,919	5,305	10,491	6,954	8,326	3,353
	Me	121,0	131,50	111,0	100,0	80,00	111,0
	s _x	22,148	22,508	20,982	19,668	20,394	23,706
	min	89	84	85	79	72	72
	max	158	153	126	128	120	158

Označení slévárenského provozu: **S5**

Technologie tavení: IPSF

Obsah tavícího zařízení: 3t

Vyráběný materiál: **GJS**

Složení vsázky: 45% vrat, 15% zlomkovina, 30% ocelový šrot, 10% slév.sur.železo

Očkovadlo, modifikátor: 75% FeSi, Mg

Způsob modifikace: v pánvi

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Odlévání do forem: jednotná bentonitová směs

Celkový počet provedených měření: **10**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.5

Tab.č.13: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu ve slévárně S5

S5		Pořadí měření		Materiál
		I	V	GJS
Oox /ppm/	n	10	10	20
	Ø	20,50	19,30	19,90
	ChP	0,167	1,461	0,729
	Me	20,50	19,00	20,00
	s _x	0,527	4,620	3,259
	min	20	12	12
	max	21	27	27
N /ppm/	n	10	10	20
	Ø	60,60	58,30	59,45
	ChP	3,135	2,201	1,883
	Me	61,00	58,50	58,50
	s _x	9,913	6,961	8,420
	min	51	47	47

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

	max	70	68	70
--	-----	----	----	----

Pro zjištění, zda má na obsah Oox a dusíku v jednotlivých slévárenských provozech, používajících technologii IPSF, vliv celkový proces výroby (výroba v dopoledních nebo nočních hodinách, 24 hodinový výrobní proces, obsah tavícího zařízení, využití udržovacího zařízení, způsob prováděné modifikace....), byl proveden test č.1. Bližší popis použitých statistických metod je uveden v následující kapitole 8. *Statistické testování významnosti rozdílů mezi sledovanými parametry a obsahem plynů v tekutém kovu, str.63-65.*

Výchozí model bez náhodných faktorů byl označen jako A, model s náhodnými faktory jako B. Z výsledku testu vyplynulo, že žádný slévárenský provoz nemá výrazně odlišné naměřené hodnoty Oox a dusíku v průběhu celého výrobního procesu. Můžeme tedy konstatovat, že ačkoli má každá slévárna svoje výrobní specifiky, nemají tyto odlišnosti statisticky průkazný vliv na obsah Oox a dusíku v litině.

Tab. č.14: ANOVA testovaného modelu

	Model	Hodnota t	Hodnota p
A	1	-	-
B	2	1 vs. 2	0,5757

Vzhledem k výše uvedenému výsledku testu č.1, jsem pro následné statistické zpracování naměřených hodnot obsahu Oox a dusíku sloučila všechna měření v elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecích (IPSF) do jedné skupiny s označením S1-S5. Základní statistická charakteristika této skupiny je uvedena v následující tabulce č.15.

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Označení slévárenského provozu: **S1 – S5**

Technologie tavení: IPSF

Vyráběný materiál: **GJL, GJS**

Celkový počet provedených měření: **74**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.1-5

Tab.č.15: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu S1-S5

S1 – S5		Pořadí měření						Materiál	
		I	II	III	IV	V	VI	GJL	GJS
Oox /ppm/	n	61	58	4	25	30	6	68	116
	Ø	26,79	29,76	18,50	29,00	31,47	13,50	22,78	28,17
	ChP	1,963	3,071	4,173	2,802	5,491	2,432	1,578	2,197
	Me	21,00	23,50	16,50	28,00	20,50	13,50	20,00	23,50
	s _x	15,333	23,385	8,347	14,01	30,07	5,958	13,010	23,664
	min	7	3	11	8	5	4	3	4
	max	83	124	30	64	129	21	64	129

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

N /ppm/	n	61	58	4	25	29	6	68	115
	Ø	77,16	84,84	108,25	84,76	67,03	89,50	84,24	77,68
	ChP	4,182	4,534	10,491	3,642	4,802	8,326	2,231	3,366
	Me	70,00	90,00	111,0	91,00	62,00	80,00	91,00	70,00
	s _x	32,663	34,527	20,982	18,210	25,88	20,394	18,401	36,097
	min	36	28	85	45	39	72	40	28
	max	158	153	126	108	128	120	108	158

7.1.2 Charakteristika slévárny využívající technologii bubnových rotačních plynových pecí

Označení slévárenského provozu: **S6**

Technologie tavení: BRPP

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Obsah tavícího zařízení: 3,5 a **8 t**

Vyráběný materiál: **GJL, GJS**

Složení vsázky: 50% vrat, 30% ocelový šrot, 20% slév.sur.železo

Očkovadlo, modifikátor: 75% FeSi, Mg

Způsob modifikace: v pánvi

Odlévání do forem: jednotná bentonitová směs

Celkový počet provedených měření: **23**

Výsledky provedených měření a výpočtů: příloha č.6-A,č.6-B

Tab.č.16: Naměřené obsahy Oox a N dle pořadí měření a materiálu ve slévárně S6

S6		Pořadí měření				Materiál	
		I	II	IV	V	GJL	GJS
Oox /ppm/	n	22	16	3	18	8	52
	Ø	24,18	24,25	20,33	12,09	21,13	19,56
	ChP	0,686	2,653	1,322	1,722	1,705	1,393
	Me	24,00	20,00	18,00	9,00	21,50	24,00
	s _x	3,217	10,611	4,992	8,076	4,824	10,042
	min	11	7	18	4	14	4
	max	26	48	20	31	26	48
	n	22	16	3	18	8	52
	Ø	21,18	17,81	51,33	23,68	54,25	16,12

N /ppm/	ChP	3,871	3,238	2,895	2,703	3,178	0,968
	Me	14,50	13,00	53,0	21,00	55,50	16,00
	s _x	18,157	12,952	9,121	12,677	8,988	6,981
	min	8	5	43	5	41	536
	max	63	50	58	58	63	63

7.1.3 Diskuse naměřených hodnot obsahu kyslíku ve formě oxidů a dusíku

Při porovnání naměřených obsahů Oox a dusíku u skupiny S1-S5 a S6 s odbornou literaturou můžeme konstatovat následující:

- obsah Oox v IPSF odpovídá hodnotám uváděných v odborné literatuře
- obsah dusíku v IPSF odpovídá hodnotám uváděných v odborné literatuře
- obsah Oox u BRPP je nižší než uvádí odborná literatura
- obsah dusíku u BRPP je nižší než uvádí odborná literatura.

Důvodem dosažení tohoto výsledku může být použití kvalitních vstupních surovin, zvládnutí technologie výroby v jednotlivých fázích výroby tekutého kovu, odebrání kvalitního vzorku pro následnou analýzu obsahu Oox a dusíku.

Nižší naměřené hodnoty Oox a dusíku u technologie bubnových rotačních plynových pecí mohou být způsobeny přímým stykem plamene hořáku se vsázkou – tekutým kovem, intenzivnějším promícháváním taveniny v bubnu a dohřívání tekutého kovu v peci před dalším odběrem.

7.2 Teplotní, tlakový a časový průběh tavení a jeho vliv na obsah celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku

7.2.1 Měření v laboratorních podmínkách

V laboratorních podmínkách byla provedena na Katedře slévárenství zkušební tavba, která sloužila pro ověření metody odebrání a vyhodnocování vzorků pro stanovení obsahu O₂ a dusíku v tavenině.

Byla tavena litina s lupínkovým grafitem s následujícími parametry:

	vzorek	C	Si	Al	t_p	t_R	t_{PUV}
	č.	%	%	%	°C	°C	°C
Tavba v IPSF	I	3,35	1,88	0,004	1510	1449	1502

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Tavba v IPSF	II	3,29	1,87	0,003	1505	1446	1449
--------------	----	------	------	-------	------	------	------

čas	nerovnost	P_{M+A}	$p_{CO TP}$	O_{OX}	N	Al_{min}	Al_{max}
<i>min</i>	<i>(≤ 6800)</i>	<i>atm</i>	<i>atm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	%	%
-	-	1,01	1,30	35	47	-	-
3,5	12184	1,01	1,28	28	45	-	-

Ve vzorku č.I, odebraném při teplotě 1510°C – tedy při nejvyšší dosažené teplotě tavení, činil obsah O_{OX} 35 ppm. Po uplynutí 3,5 min, kdy byla stažena struska a byl při teplotě 1505 °C odebrán vzorek č.II, obsah O_{OX} v tomto vzorku byl 28 ppm. Teplota rovnováhy pro dané chemické složení je 1449°C, teplota počátku uhlíkového varu činí 1502°C. Výpočtem pravé strany nerovnice (66) zjišťujeme, že se pro výše uvedené parametry nacházíme nad pod hodnotou 6800, tedy v oblasti s možným výskytem endogenních bublin. Porovnáním výše uvedených teplot zjišťujeme, že se teplota tavení nacházela 8°C nad počátkem uhlíkového varu → v tavenině byly vytvořeny podmínky pro proběhnutí uhlíkového varu. Hodnota parciálního tlaku CO pro danou teplotu tavení činila 1,30 atm, hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku byla 1,01 atm. Při porovnání obou hodnot tlaků vidíme, že v tavenině byly při dané teplotě tavení optimální podmínky pro vyplouvání vznikajících bublin CO.

Obsah O_{OX} v tekutém kovu spadá do intervalu hodnot O_{OX} uváděných v odborné literatuře [11],[12],[13].

U odlitků odlitých z této zkušební tavby nebyl potvrzen výskyt žádné slévárenské vady.

7.2.2 Měření ve slévárenských provozech využívající technologii

elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí

Na základě provedených měření a vyhodnocení získaných informací jsem průběh tavení v IPSF rozdělila do 3 skupin.

První skupina taveb probíhá, jak po stránce chemického složení, tak po stránce tlakové a teplotní optimálně a v odlitcích z takto vyrobené litiny se endogenní bubliny nebudou vyskytovat – viz příklad č.1.

Příklad č.1 - Byla tavena litina s lupínkovým grafitem s následujícími parametry

	vzorek	C	Si	Al	t _p	t _R	t _{PUV}
	č.	%	%	%	°C	°C	°C
Tavba v IPSF	I	3,40	1,89	0,005	1520	1453	1505
Tavba v IPSF	II	3,42	1,89	0,005	1500	1442	1496
Po očkování	IV	3,35	2,09	0,005	1450	-	-

čas	nerovnost	p _{M+A}	p _{CO TP}	O _{OX}	N	Al _{min}	Al _{max}
<i>min</i>	(≤6800)	<i>atm</i>	<i>atm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	%	%
-	-	1,52	1,75	20	65	-	-
3,5	5776	1,52	1,34	20	72	-	-
-	-	-	-	33	75	0,028	0,079

Ve vzorku č.I, odebraném při teplotě 1520°C – tedy při nejvyšší dosažené teplotě tavení, činil obsah O_{ox} 20 ppm. Po uplynutí 3,5 min, kdy byla stažena struska a obsah IPSF byl vylit do transportní pánve, byl při teplotě 1500°C odebrán vzorek č.II, obsah O_{ox} v tomto vzorku byl 20 ppm. Teplota rovnováhy pro dané chemické složení je 1442°C, teplota počátku uhlíkového varu činí 1496°C. Výpočtem pravé strany nerovnice (66) zjišťujeme, že se pro výše uvedené parametry nacházíme mírně pod hodnotou 6800, tedy v oblasti bez výskytu endogenních bublin. Tuto skutečnost potvrzují i obsahy O_{ox} v odebraných vzorcích č.I a č.II. Porovnáním výše uvedených teplot zjišťujeme, že se teplota tavení nacházela 15°C nad počátkem uhlíkového varu → v tavenině probíhal uhlíkový var. Hodnota parciálního tlaku CO pro danou teplotu tavení činila 1,75 atm, hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku byla 1,52 atm. Při porovnání obou hodnot tlaků vidíme, že v tavenině byly při dané teplotě tavení optimální podmínky pro vyplouvání vznikajících bublin CO.

Po provedeném očkování byl na licím poli při teplotě 1450°C odebrán vzorek č.IV. Obsah O_{ox} v tomto vzorku mírně stoupl na 33 ppm. Obsah O_{ox} v tekutém kovu spadá do intervalu hodnot O_{ox} (pro tavení v IPSF) uváděných v odborné literatuře [11],[12],[13] a proto není třeba provádět žádné další operace pro dezoxidaci tekutého kovu.

U odlitků odlitých z taveb této skupiny nebyl slévárnami potvrzen výskyt endogenních bublin.

Do **druhé skupiny** taveb jsem zařadila tavby, u nichž byl zjištěn vyšší obsah O_{ox} . Pro snížení zvýšeného obsahu O_{ox} bylo doporučeno zvýšit teplotu tavení nad teplotu počátku uhlíkového varu, byla určena optimální časová výdrž na této teplotě tavení a případně bylo doporučeno použít vhodné množství hliníku jako dezoxidačního prostředku - viz. příklad č.2.

Příklad č.2 - Byla tavena litina s kuličkovým grafitem s následujícími parametry

	vzorek	C	Si	Al	t_p	t_R	t_{PUV}
	č.	%	%	%	°C	°C	°C
Tavba v IPSF	I	3,69	2,00	0,009	1561	1477	1524
Tavba v IPSF	II	3,69	2,00	0,009	1558	1474	1521
Po očkování	V	3,58	2,42	0,023	1435	-	-

čas	nerovnost	p_{M+A}	p_{CO TP}	O_{OX}	N
<i>min</i>	<i>(≤6800)</i>	<i>atm</i>	<i>atm</i>	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>
-	-	1,52	2,06	62	142
0,42	2470	1,52	2,01	54	136
-	-	-	-	-	-

Při teplotě 1561°C byl odebrán vzorek č.I, ve kterém byl stanoven obsah O_{OX} na 62 ppm. Po stažení strusky byl při teplotě 1558 °C odebrán vzorek č.II a obsah pece byl přelit do transportní pánve. Teplota rovnováhy pro dané chemické složení je 1474°C, teplota počátku uhlíkového varu činí 1521°C. Výpočtem pravé strany nerovnice (66) zjišťujeme, že se pro výše uvedené parametry nacházíme nad hodnotou 6800, tedy v oblasti s možností výskytu endogenních bublin. Porovnáním výše uvedených teplot zjišťujeme, že se teplota tavení nacházela 37°C nad počátkem uhlíkového varu → v tavicím agregátu probíhal uhlíkový var. Hodnota parciálního tlaku CO pro danou teplotu tavení činila 2,06 atm, hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku byla 1,52 atm. Při porovnání

obou hodnot tlaků vidíme, že v tavenině byly při dané teplotě tavení optimální podmínky pro vyplouvání vznikajících bublin CO.

Po provedené modifikaci s následným očkování byl na licím poli při teplotě 1435°C odebrán vzorek III, z něhož se však nepodařilo získat hodnoty O_{ox} a dusíku.

Obsahy O_{ox} v tekutém kovu jsou vyšší, než uvádí odborná literatura pro tavení v IPSF [11],[12],[13] a proto bylo při dalších měřeních doporučeno zvýšení teploty tavení nad teplotu počátku uhlíkového varu, byla určena časová výdrž na této teplotě tavení a případně doporučena dezoxidace tekutého kovu hliníkem.

U odlitků odlitých z taveb této skupiny byl slévárnami potvrzen výskyt endogenních bublin a to celkem u 15 sledovaných taveb.

Do **třetí skupiny** taveb zahrnujeme tavby, které pro své specifické parametry (velmi nízký nebo velmi vysoký obsah O_{ox}) nelze zařadit do předcházejících dvou skupin – příklad č.3.

Příklad č.3 - Byla tavena litina s lupínkovým grafitem s následujícími parametry

	vzorek	C	Si	Al	t_p	t_R	t_{PUV}
	č.	%	%	%	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
Tavení v IPSF	I	3,66	2,32	0,003	1541	1469	1518
Po očkování	IV	-	-	-	1410	-	-

čas	nerovnost	p_{M+A}	$p_{CO TP}$	O_{OX}	Al_{min}	Al_{max}
-----	-----------	-----------	-------------	----------	------------	------------

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

<i>min</i>	<i>(≤6800)</i>	<i>atm</i>	<i>atm</i>	<i>ppm</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
3,5	18144	1,3	1,75	6	-	-
-	-	-	-	9	0,0077	0,0217

Ve vzorku č.I, odebraném při teplotě 1541°C – tedy při nejvyšší dosažené teplotě tavení, činil obsah O_{ox} 6 ppm. Výdrž na teplotě 1541°C činila 3,5 minuty, během níž byla stažena struska a obsah IPSF byl vylit do transportní pánve. Teplota rovnováhy pro dané chemické složení je 1469°C, teplota počátku uhlíkového varu činí 1518°C. Výpočtem pravé strany nerovnice (66) zjišťujeme, že se pro výše uvedené parametry nacházíme nad hodnotou 6800, tedy v oblasti s možným výskytem endogenních bublin. Tuto skutečnost však vyvrací obsah O_{ox} odebraný ve vzorku č.I. Porovnáním výše uvedených teplot zjišťujeme, že se teplota tavení nacházela 37°C nad počátkem uhlíkového varu → v tavenině probíhal uhlíkový var. Hodnota parciálního tlaku CO pro danou teplotu tavení činila 1,75 atm, hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku byla 1,30 atm. Při porovnání obou hodnot tlaků vidíme, že v tavenině byly při dané teplotě tavení optimální podmínky pro vyplouvání vznikajících bublin CO.

Po provedeném očkování byl na licím poli při teplotě 1410°C odebrán vzorek č.II. Obsah O_{ox} v tomto vzorku mírně stoupl na 9 ppm.

Obsahy O_{ox} jsou velmi nízké a svědčí o kvalitně provedené tavbě.

U odlitků odlitých z této skupiny nebyl slévárnami potvrzen výskyt endogenních bublin.

7.2.3 Měření ve slévárenských provozech využívající technologii bubnových rotačních plynových pecí

Na základě provedených měření a vyhodnocení získaných informací jsem, z důvodu naměřených nižších obsahů O_{ox}, než uvádí odborná literatura pro tavení v BRPP-[11],[12],[13], neprovedla žádné rozdělení jednotlivých taveb do skupin.

Průběh tavení v bubnové rotační peci s následným zpracováním tekutého kovu je uveden v následujícím příkladu č.4.

Příklad č.4 - Byla tavena litina s kuličkovým grafitem s následujícími parametry

	vzorek	C	Si	Al	t _p	t _R	t _{PUV}
	č.	%	%	%	°C	°C	°C
Tavba v IPSF	I	3,64	1,80	-	1553	1468	1517
Tavba v IPSF	II	3,64	1,80	-	1549	1465	1514
Po modifikaci	V	3,65	2,62	0,011	-	-	-

čas	nerovnost	p _{M+A}	p _{CO TP}	O _{ox}	N	Al _{min}	Al _{max}
min	(≤6800)	atm	atm	ppm	ppm	%	%
-	-	1,18	1,95	26	8	-	-
1,65	11467	1,16	1,89	20	5	-	-
-	-	-	-	7	18	0,006	0,017

Ve vzorku č.I odebraném při teplotě 1553°C – tedy při nejvyšší dosažené teplotě tavení, činil obsah O_{ox} 26 ppm. Po uplynutí 1,65 min byl při teplotě 1549°C odebrán vzorek č.II, obsah O_{ox} v tomto vzorku byl 20 ppm. Teplota rovnováhy pro dané chemické složení je

1468°C, teplota počátku uhlíkového varu činí 1517°C. Výpočtem pravé strany nerovnice (66) zjišťujeme, že se pro výše uvedené parametry nacházíme nad hodnotou 6800, tedy v oblasti s možným výskytem endogenních bublin. Porovnáním výše uvedených teplot zjišťujeme, že se teplota tavení nacházela 36°C nad počátkem uhlíkového varu → v tavenině probíhal uhlíkový var. Hodnota parciálního tlaku CO pro danou teplotu tavení činila 1,95 atm, hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku byla 1,18 atm. Při porovnání obou hodnot tlaků vidíme, že v tavenině byly při dané teplotě tavení optimální podmínky pro vyplouvání vznikajících bublin CO.

Po provedené modifikaci s následným očkováním byl na licím poli odebrán vzorek č.V. Obsah O_{ox} v tomto vzorku činil 7 ppm.

Obsah O_{ox} v tekutém kovu je nižší než uvádí odborná literatura pro tavení v rotační plynové peci [11],[12],[13] a proto nebyly prováděny žádné další operace pro dezoxidaci tekutého kovu.

U 5 z 23 sledovaných taveb byl slévárnou potvrzen výskyt endogenních bublin.

7.3 Výskyt slévárenských vad

Ve spolupráci s jednotlivými slévárenskými provozy byla sledována kvalita tekutého kovu nejen z hlediska obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku, ale také z hlediska výskytu některých slévárenských vad – zejména pak endogenních bublin.

7.3.1 Výskyt endogenních bublin u taveb v elektrických indukčních

středofrekvenčních kelímkových pecích

U 15 ze 74 provedených měření bylo po otryskání odlitků slévárnami zjištěno, že odlitky vykazují některou ze slévárenských vad. U 5 z 15 taveb byl zjištěn kromě výskytu plynových vad odlitků, také výskyt jiných slévárenských vad – zadrobeniny, trhliny.

U odlitků s dutinami byly odebrány vzorky, které byly následně podrobeny zkoumání na REM. Bylo zjištěno, že u 3 vzorků se jedná o plynové vady exogenního charakteru a u 7 vzorků se jedná o plynové vady endogenního charakteru.

Ukázka odlitku s dutinami a fotografie z provedených analýz odebraných vzorků jsou v přílohách č.8-11.

7.3.2 Výskyt endogenních bublin u taveb v bubnových rotačních

plynových pecích

U 5 z 23 provedených měření bylo po otryskání odlitků slévárnou zjištěno, že vykazují některou z plynových vad. Z odlitků byly odebrány vzorky, které byly následně podrobeny analýze na REM. Bylo zjištěno, že u všech 5 taveb se jedná o plynové vady endogenního charakteru - jejich hlavním původcem byla přítomnost strusky v tekutém kovu.

Fotografie odlitku, včetně fotografií z provedených analýz jsou v přílohách č.12-15.

8. Statistické testování významnosti rozdílů mezi sledovanými

parametry a obsahem plynů v tekutém kovu

Z široké oblasti matematické statistiky byly pro statistické vyhodnocení dat zvoleny dva parametrické testy a to Studentův t-test, který k testování využívá hodnotu směrodatné odchylky a analýza rozptylu (F-test), která ověřuje, zda zvolená hodnota náhodné veličiny má statisticky významný vliv na sledovaný parametr. Pro vyjádření souvislosti mezi dvěma a více statistickými znaky byla použita regresní a korelační analýza. Pro matematické vyjádření závislosti byly použity regresní rovnice a pro grafické vyjádření byly použity regresní křivky a krabicové diagramy.

Studentův t-test, dle literatury [51], umožňuje ověřit hypotézu, zda se výsledky měření na jedné straně významně liší od výsledků měření na straně druhé. Celý test je tedy založen na skutečnosti, že výběrový průměr z normálního rozdělení, od něhož se odečte střední hodnota tohoto rozdělení a získaný rozdíl se vydělí směrodatnou odchylkou, má Studentovo rozdělení. Výsledky výpočtů se zaznamenávají do tabulky, v níž jednotlivé sloupce mají tento význam:

- hodnota t je hodnota testovacího kritéria

- hodnota p určuje, na jaké hladině významnosti je možné zamítnout hypotézu, že oba použité modely jsou rovnocenné. Hodnota p se porovnává s předem stanoveným číslem (zvolena hladina spolehlivosti 0,05). Čím je hodnota p menší než 0,05, tím je vliv sledovaného znaku průkaznější, čím je naopak hodnota p větší než 0,05, tím sledovaný znak nemá statisticky významný vliv.

Pro výklad a pochopení hodnot uvedených v tabulce jsou nejdůležitější p hodnoty, které mohou být v některých statistických programech doplněny znakem hvězdičky (* - průkazný vliv sledovaného znaku , ** - silně průkazný vliv sledovaného znaku, *** - velmi silně průkazný vliv sledovaného znaku na určený parametr).

Analýza rozptylu (ANOVA – anglická zkratka pro ANalysis Of VAriance) je, dle literatury [51], založena na porovnávání dvojic modelů a umožňuje ověřit, zda na hodnotu náhodné veličiny má statisticky významný vliv hodnota některého sledovaného znaku. Výsledky výpočtů a porovnávání dvojic se zaznamenávají do tabulky, v níž jednotlivé sloupce mají tento význam:

- počet stupňů volnosti vyjadřuje, kolik parametrů navíc se používá
- suma čtverců vyjadřuje, o jaké číslo klesne v daném modelu (po zařazení uvedeného znaku nebo kombinace) součet druhých mocnin odchylek od odhadnutých středních hodnot
- hodnota F je hodnota testovacího kritéria, které porovnává dvojici modelů
- hodnota p určuje, na jaké hladině významnosti je možné zamítnout hypotézu, že oba použité modely jsou rovnocenné. Hodnota p se porovnává s předem stanoveným číslem (nejčastěji s 0,05). Čím je hodnota p menší než 0,05, tím je výsledek statisticky více významný, naopak čím je hodnota p větší než 0,05, tím je výsledek statisticky nevýznamný.

Pro výklad a pochopení hodnot uvedených v tabulce jsou nejdůležitější p hodnoty, které v některých statistických programech bývají doplněny znakem hvězdičky (* - průkazný vliv sledovaného znaku , ** - silný vliv sledovaného znaku , *** - velmi silný vliv sledovaného znaku na určený parametr).

Regresní analýza, dle literatury [52], slouží k vyjádření způsobu vzájemné závislosti mezi zvolenými proměnnými, jejíž průběh se matematicky zapisuje jako regresní rovnice a graficky se zobrazuje jako regresní křivka, která má nejčastěji lineární charakter. Tento typ zobrazení závislosti mezi sledovanými parametry jsem použila v podkapitolách 8.1 a 8.2.

Korelační analýza, dle literatury [52], zkoumá stupeň závislosti mezi sledovanými veličinami, tj. zda je nebo není mezi proměnnými vzájemná závislost. Software, který jsem použila pro statistické zpracování nepoužívá korelační koeficient, ale tzv. konfidenční interval, který se sleduje pro každý jednotlivý sledovaný parametr.

Krabicové diagramy (boxy), dle literatury [52], se používají pro přehlednou informaci o datech. Box má nejčastěji obdélníkový tvar, v jehož středu je silně vyznačen medián, krajní hodnoty boxu jsou tvořeny dolním a horním kvantilem a délka boxu je rovna kvantilovému rozpětí. Výška boxu je volena úměrně k \sqrt{n} . Z boxu vedou dvě úsečky, které jsou ukončeny vnitřními hradbami. Pokud jsou naměřené hodnoty mimo vnitřní hradby, jsou označovány prázdnými kolečky a bývají podezřelé z odlehlosti. Tento typ zobrazení dat jsem použila v podkapitolách 8.3 a 8.4.

Vzhledem ke skutečnosti, že analýza rozptylu pro více sledovaných znaků je výpočetně velmi náročná metoda, bylo celé statistické testování (t-test, F-test, korelační a regresní analýza, krabicové diagramy) provedeno ve speciálním, volně přístupném statistickém softwaru - programu R [50,52].

Pro statistické testování významnosti rozdílů mezi sledovanými parametry a obsahem plynů v tekutém kovu byly ze všech naměřených hodnot sestaveny dva soubory statistických dat. Soubor A, který obsahuje veškerá data vztahující se k měření obsahu Oox a dusíku v IPSF a soubor B, který obsahuje veškerá data vztahující se k měření obsahu Oox a dusíku v BRPP. Dále byly oba soubory, A i B, rozděleny na dvě skupiny. První skupina obsahuje data týkající se tavení v peci (data v řadách označených I a II). Druhá skupina

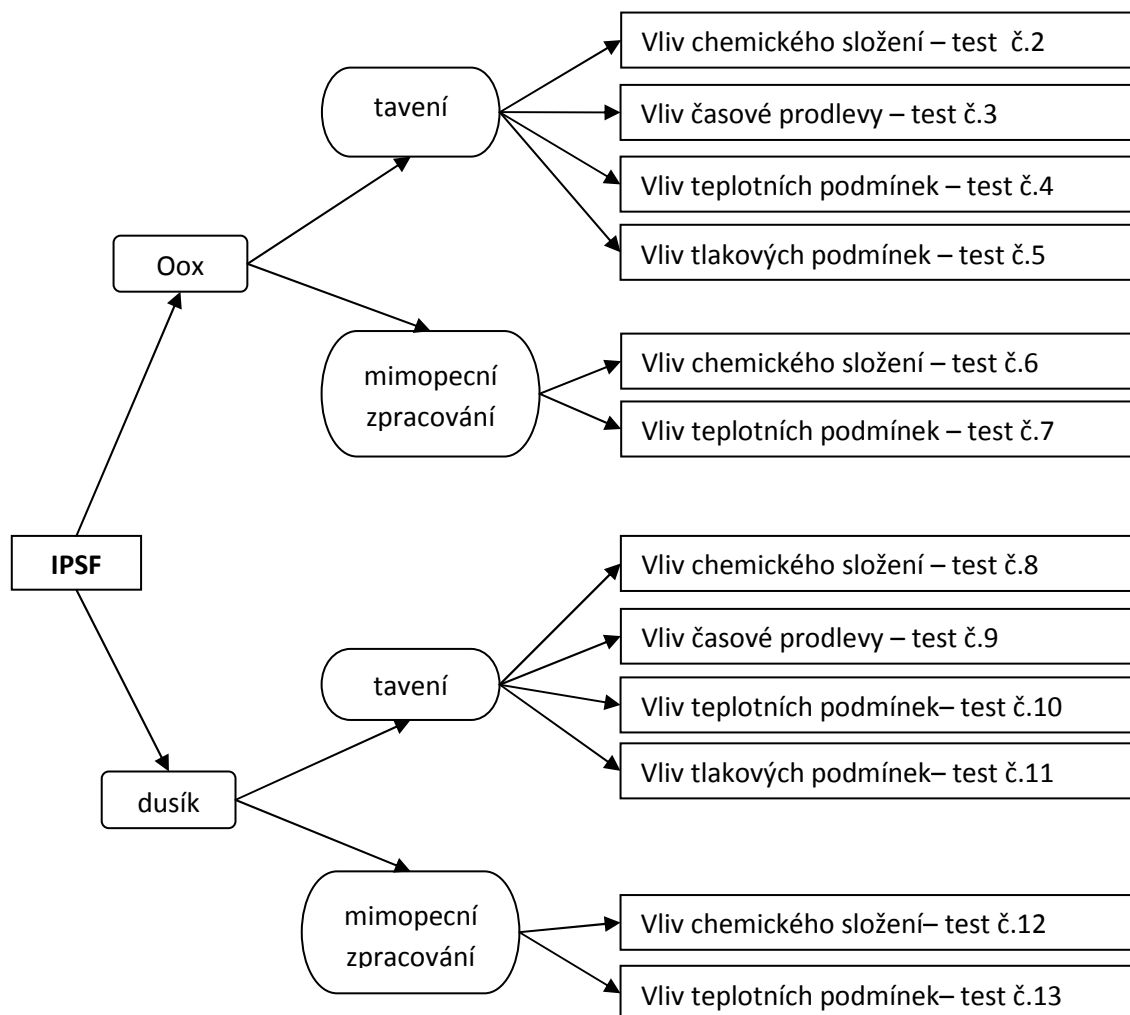
obsahuje data týkající se mimopecního zpracování tekutého kovu (data v řadách označených III, IV, V a VI).

8.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah plynů u elektrických

indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí

Pro zjištění vlivu sledovaných parametrů na obsah O₂ a dusíku v litině u sléváren používajících pro výrobu tekutého kovu elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece bylo provedeno celkem 12 testů. Jejich rozdělení je uvedeno v následujícím obrázku č.14.

Obr.č.14: Schematické znázornění provedených testů u technologie IPSF



8.1.1. Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox

8.1.1.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při tavení

Test č.2 – Vliv chemického složení na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, síry, chromu, hořčíku a hliníku na obsah Oox při tavení byl proveden test č.2. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.17: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 107,677	36,729	- 2,935	0,00410
C	25,883	8,773	2,950	0,00388 **
Si	- 1,850	1,828	- 1,012	0,31374
Mn	- 3,660	11,334	- 0,323	0,74735
P	221,762	87,843	2,525	0,01301 *
S	- 701,434	242,471	- 2,893	0,00460 **
Cr	504,246	168,514	2,992	0,00342 **
Mg	5469,412	2603,985	2,100	0,03798 *
Al	878,475	351,209	2,501	0,01385 *

Tab.č.18: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	4394	14,8267	0,0001984 ***

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Si	1	280	0,9457	0,3329459
Mn	1	5	0,0167	0,8972849
P	1	362	1,2200	0,2717631
S	1	1033	3,4848	0,0645977
Cr	1	3755	12,6689	0,0005503 ***
Mg	1	1258	4,2433	0,0417667 *
Al	1	1854	6,2565	0,0138471 *

Z výsledků testu č.2, které jsou uvedeny v tabulce č.17 a 18 vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obsahu uhlíku, chromu, hořčíku a hliníku při tavení na obsah Oox v tavenině, tj. bylo statisticky prokázáno, že se obsah Oox v tavenině s rostoucím obsahem C, Cr, Mg a Al snižuje. U ostatních sledovaných prvků – Si, Mn, P a S – nebyl prokázán statisticky významný vliv na obsah Oox v tekutém kovu při tavení.

Tyto výsledky jsou v souladu s teoretickými předpoklady jen z části, neboť jsem, dle teorie, očekávala, že se projeví vliv uhlíku a zejména pak křemíku na obsah Oox v tavenině, neboť oba prvky při tavení výrazně mění svůj obsah. Obsah uhlíku se snižuje propalem a bývá často přidáván nauhličovadlem. Obsah křemíku se zvyšuje po přidavku ferrosilicia. Vliv uhlíku byl statisticky potvrzen a příčinou této skutečnosti může být právě změna jeho obsahu, která se pohybuje v řádu desetin procent a která je již z hlediska statistického zpracování významná. Příčinou vlivu ostatních prvků, tj. chromu, manganu a hliníku, může být skutečnost, že tyto prvky měnily svůj obsah při tavení jen velmi málo, většinou vůbec, a pokud ano, pak jen v tisícinách procenta, ale výrazně se měnil obsah naměřeného obsahu Oox. Křemík měnil svůj obsah při tavení v řádech setin procent a z hlediska statistického zpracování nebyla tato změna, z hlediska vlivu na obsah Oox, statisticky významná.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu chemického složení na obsah Oox v tavenině v peci je možné sestavit regresní rovnici (70).

$$\text{Oox} = -107,677 + 25,883 \text{ C} + 504,246 \text{ Cr} + 5469,412 \text{ Mg} + 878,475 \text{ Al} + e \quad (70)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku (ppm)

Mg ...obsah hořčíku (%)

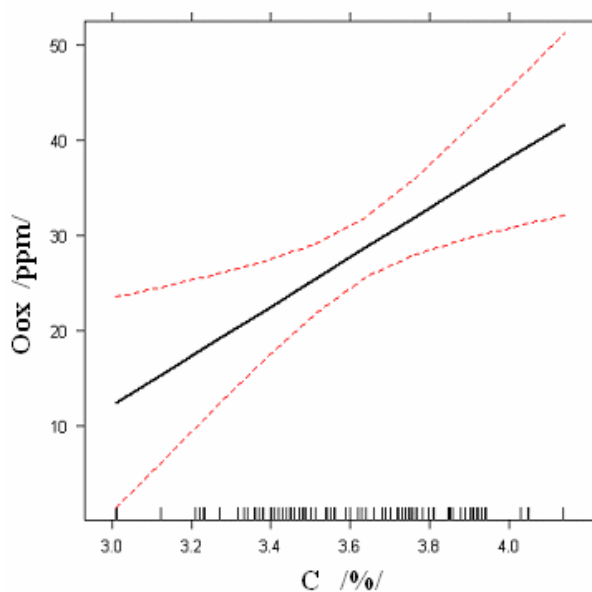
C ... obsah uhlíku (%)

Al ... obsah hliníku (%)

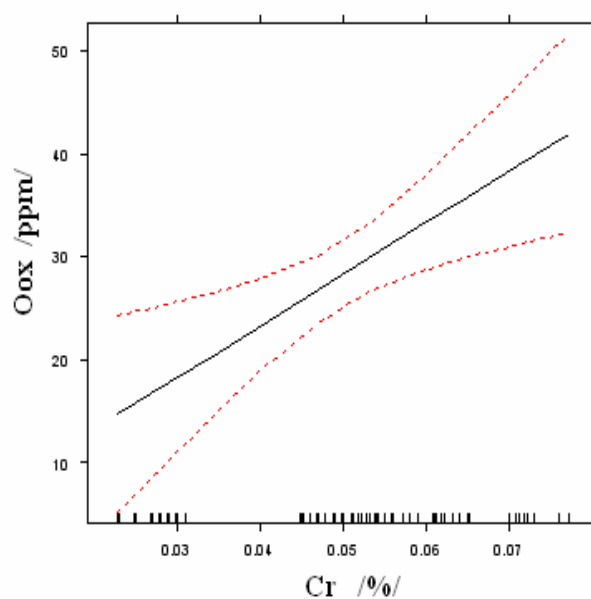
Cr ... obsah chromu (%)

e... modelem nevysvětlitelná variabilita

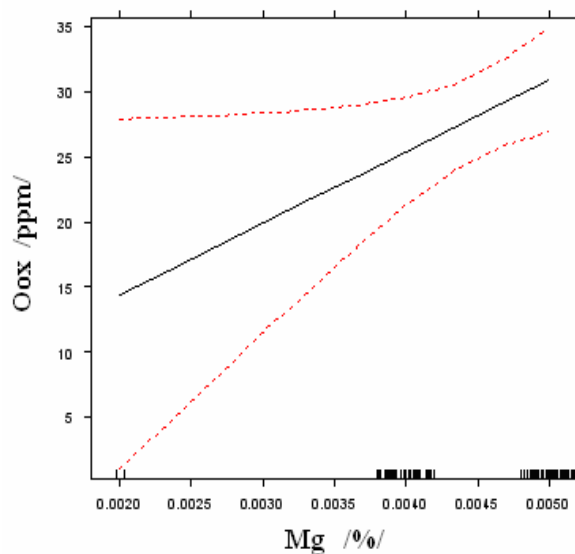
Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv uhlíku, chromu, hořčíku a hliníku na obsah Oox, tak jak je na základě naměřených hodnot predikuje regresní model, jsou na obrázcích č.15, 16, 17, 18.



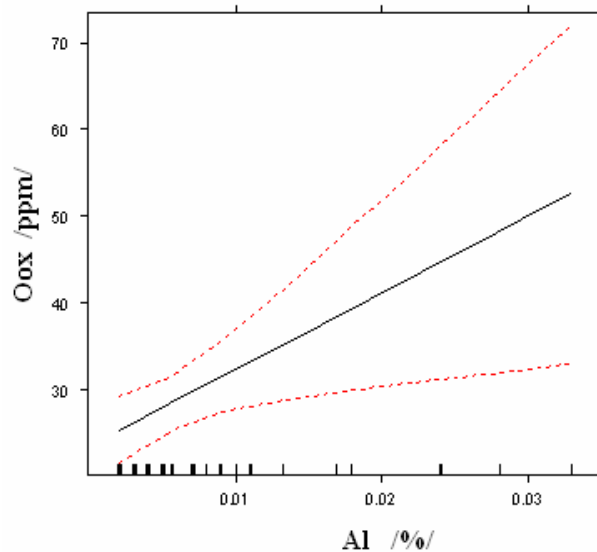
Obr.č.15: Vliv uhlíku na obsah Oox



Obr.č.16: Vliv chromu na obsah Oox



Obr.č.17: Vliv hořčíku na obsah Oox



Obr.č.18: Vliv hliníku na obsah Oox

Test č.3 - Vliv časové prodlevy na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu časové prodlevy při tavení na obsah Oox byl proveden test č.3. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.19: Koeficienty t-testu vlivu časové prodlevy při tavení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

průsečík	20,3901	2,8658	7,115	8,23e-10
čas	0,7385	0,3327	2,220	0,0297 *

Tab.č.20: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
čas	1	1045,3	4,9283	0,02971 *

Z výsledků testu č.3, které jsou uvedeny v tabulce č.19 a 20, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv časové prodlevy na obsah Oox v tekutém kovu, tzn., že čím déle je tavenina držena v peci, tím více Oox obsahuje.

Tento výsledek je v souladu s teoretickými předpoklady a potvrzuje závěry německých badatelů [2],[3], [20-22]. Příčinou tohoto jevu může být porušení chemické rovnováhy mezi taveninou a struskou (teplota v peci se výrazně nemění), kdy obsah Oox ve strusce bude ve vyšší koncentraci než v tavenině a Oox tak bude přecházet z místa o vyšší koncentraci do místa s nižší koncentrací.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu časové prodlevy na obsah Oox v peci je možné sestavit regresní rovnici (71).

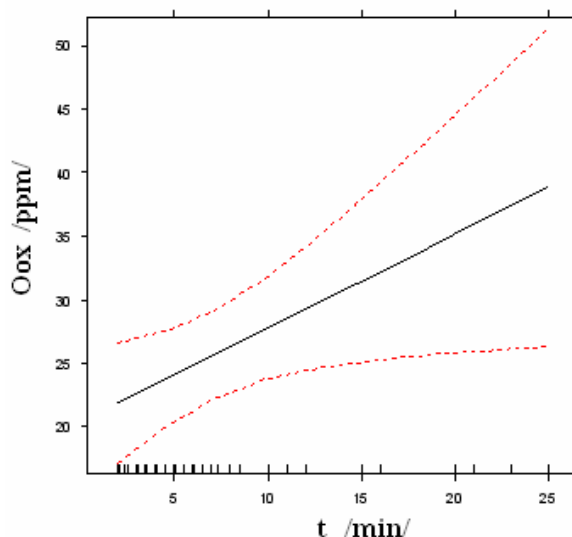
$$\text{Oox} = 20,3901 + 0,7385 t + e \quad (71)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku (ppm)

t ... čas (min)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv časové prodlevy na obsah Oox, tak jak ji na základě naměřených hodnot predikuje regresní model, je na obrázku č.19.



Obr.č.19: Vliv času na obsah Oox

Test č.4 – Vliv teplotních podmínek tavení na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu teploty tavení, rovnovážné teploty a teploty počátku uhlíkového varu na obsah Oox při tavení byl proveden test č.4.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.21: Koeficienty t-testu vlivu teplotních podmínek při tavení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

průsečík	140,56023	603,20352	0,233	0,8162
t_p	0,11743	0,05350	2,195	0,0302 *
t_R	- 0,07791	1,25048	- 0,062	0,9504
t_{PUV}	- 0,11910	1,57793	- 0,075	0,9400

Tab.č.22:ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
t_p	1	1230	3,2468	0,05418 *
t_R	1	730	1,9253	0,16796
t_{PUV}	1	2	0,0057	0,93997

Z výsledků testu č.4, které jsou uvedeny v tabulce č.21 a 22, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv teploty tavení, tzn., že se zvyšující se teplotou tavení se zvyšuje i obsah Oox v tavenině. Rovnovážná teplota a teplota počátku uhlíkového varu nemá statisticky významný vliv na obsah Oox v tekutém kovu.

Výsledek testu - vliv teploty tavení na obsah Oox - odpovídá teoretickým předpokladům a jeho příčinou může být skutečnost, že se zvyšující se teplotou tavení se zvyšuje i rozpustnost plynu v kovu, kdy se prvky (plyny), které jsou chemicky vázané z těchto vazeb uvolňují. Vliv na obsah plynů může mít také pecní atmosféra, kdy tavenina, zejména na počátku tavby, není dostatečně chráněna teprve vznikající struskou a plyny z pecní atmosféry jsou tak pohlcovány tekutým kovem. Na základě výše uvedeného se domnívám, že mezi kyslíkem v plynné formě a kyslíkem ve formě Oox existuje určitá souvislost, tj. čím více kyslíku v plynné formě bude v tavenině tím více se následně vyloučí ve formě Oox.

Příčinou statisticky nevýznamného vlivu rovnovážné teploty a teploty počátku uhlíkového varu na obsah Oox může být jejich empirické určení (rovnice č.62, 63), kdy se zejména pro výpočet teploty rovnovážné využívá obsahu křemíku, u něhož nebyl statisticky potvrzen vliv na obsah Oox.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu teploty tavení na obsah Oox v tavenině v peci je možné sestavit regresní rovnici (72).

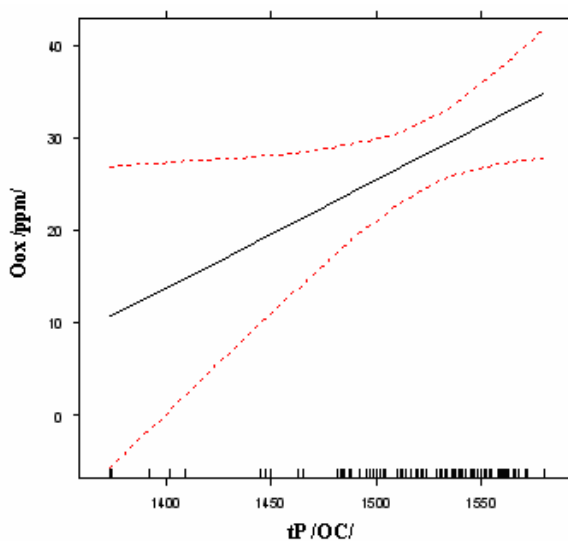
$$\text{Oox} = 140,56023 + 0,11743 t_p + e \quad (72)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku (ppm)

t_p ... teplota tavení (°C)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv teploty tavení obsah Oox, tak jak ji na základě naměřených hodnot predikuje regresní model, je na obrázku č.20.



Obr.č.20: Vliv teploty tavení na obsah Oox

Test č.5 – Vliv tlakových podmínek tavení na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku oxidu uhelnatého při tavení na obsah Oox byl proveden test č.5. Hodnoty obou tlaků byly získány výpočtem dle rovnic 64 a 65.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.23: Koeficienty t-testu vlivu tlaků při tavení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 26,197	24,780	- 1,057	0,2926
$p_{(m+a)}$	26,555	16,428	1,616	0,1087
$p_{co}(tp)$	10,199	4,185	2,437	0,0163 *

Tab.č.24: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
$p_{(m+a)}$	1	695	1,8912	0,17172
$p_{co}(tp)$	1	2184	5,9392	0,01633 *

Z výsledků testu č.5, které jsou uvedeny v tabulce č.23 a 24, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv hodnoty parciálního tlaku oxidu uhelnatého při teplotě tavení na obsah Oox v tavenině, tzn. že se obsah Oox v tavenině se zvyšující se hodnotou parciálního tlaku oxidu uhelnatého zvyšuje a naopak. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a potvrzuje platnost Sievertsova zákona, kdy se zvyšující se hodnotou tlaku, se zvyšuje rozpustnost daného plynu v tekutém kovu. Možným vysvětlením této skutečnosti může být způsob výpočtu hodnoty parciálního tlaku oxidu uhelnatého při teplotě tavení, kdy byl statisticky prokázán nejen vliv teploty tavení, ale také obsahu uhlíku na obsah Oox .

Hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku na obsah Oox v tekutém kovu nemá statisticky významný vliv. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a příčinu této skutečnosti můžeme vidět ve způsobu výpočtu, kdy hustota je vypočítána na základě chemického složení, u něhož byl prokázán pouze statisticky významný vliv 4 z 8 sledovaných prvků, a v hodnotách obsahu Oox, které se v závislosti na hodnotě tohoto tlaku výrazně nelišily a proto byl vliv tohoto tlaku na obsah Oox v tavenině vyhodnocen jako statisticky nevýznamný.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu tlakových podmínek na obsah Oox v tavenině v peci je možné sestavit regresní rovnici (73).

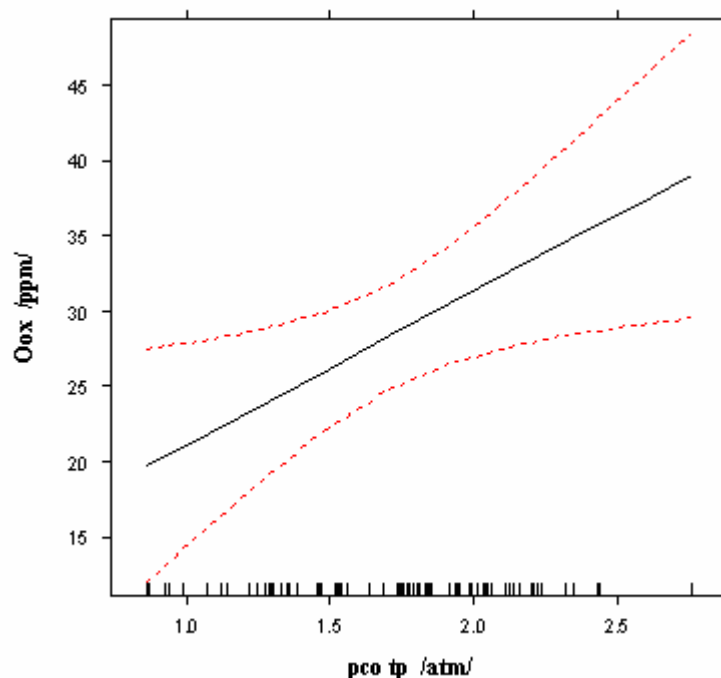
$$\text{Oox} = - 26,197 + 10,199 p_{\text{CO (tP)}} + e \quad (73)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku (ppm)

$p_{\text{CO (tP)}}$... hodnota parciálního tlaku při teplotě tavení (atm)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv parciálního tlaku oxidu uhelnatého při teplotě tavení na obsah Oox, tak jak ji na základě naměřených hodnot predikuje regresní model, je na obrázku č.21.



Obr.č.21: Vliv parciálního tlaku při teplotě tavení
na obsah Oox

8.1.1.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při mimopecním

zpracování

Z druhé skupiny dat souboru A, tedy z dat, které se týkají výhradně mimopecního zpracování tekutého kovu (řady dat označené III, IV, V a VI), byly provedeny celkem 2 testy (test č.6 a 7).

Test č.6 – Vliv chemického složení na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, síry, chromu, manganu a hliníku na obsah Oox při procesu očkování a procesu modifikace s následným očkováním byl proveden test č.6.

Tab.č.25: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 18,12	78,67	- 0,230	0,81874
C	44,45	21,47	2,071	0,04327 *
Si	- 53,86	11,80	- 4,564	3,01e-05 ***
Mn	- 37,97	17,58	- 2,159	0,03543 *
P	131,49	126,84	1,037	0,30460
S	287,86	377,41	0,763	0,44901
Cr	56,71	225,89	0,251	0,80273
Mg	752,91	245,81	3,063	0,00344 **
Al	- 281,62	428,41	- 0,657	0,51379

Tab.č.26: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	21,1	0,0564	0,8131253
Si	1	6438,1	17,2323	0,0001206 ***
Mn	1	1035,9	2,7728	0,1017795
P	1	527,3	0,4113	0,2401343

S	1	51,3	0,1372	0,7125704
Cr	1	104,7	0,2803	0,5987219
Mg	1	4609,4	12,3375	0,0009164 ***
Al	1	161,4	0,4321	0,5137911

Z výsledků testu č.6, které jsou uvedeny v tabulce č.25 a 26, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv křemíku a hořčíku na obsah Oox v tekutém kovu při mimopecním zpracování. Se zvyšujícím se obsahem křemíku se obsah Oox v tekutém kovu snižuje, se zvyšujícím se obsahem hořčíku se naopak hodnota Oox v tekutém kovu zvyšuje. Tento výsledek je v souladu s teoretickými předpoklady a jeho možné vysvětlení spatřuji v :

- obsahu křemíku, který se po provedeném očkování v tekutém kovu mění v řádu desetin procent. Křemík působí jako silné dezoxidovadlo, navazuje na sebe volný kyslík a jako SiO_2 vyplouvá na povrch taveniny do strusky, čímž se snižuje hodnota obsahu Oox v tavenině

- obsahu hořčíku, který se po provedené modifikaci razantně zvyšuje, z tisícín procenta na desetiny procenta, přičemž proces modifikace můžeme popsat jako velmi bouřlivou reakci, při níž dochází k výrazným teplotním a tlakovým změnám. A právě těmito tlakovým změnám, respektive vývinu hořčíkových par, připisují vliv na hodnotu obsahu Oox v tekutém kovu, neboť jejich vznikem dojde ke snížení obsahu kyslíku v tavenině, hladina kovu po provedeném mimopecním zpracování není výrazně chráněna před stykem s okolní atmosférou, v níž se kyslík nachází ve vyšší koncentraci než v tavenině a proto opětovně dochází k pohlcování plynu kovem, čímž se vzájemně vyrovnávají jeho koncentrace mezi kovem a okolní atmosférou.

Vliv obsahu ostatních sledovaných prvků – uhlíku, manganu, fosforu, síry, chromu a hliníku - na obsah Oox při mimopecním zpracování není statisticky významný. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být obsah těchto prvků, který se po provedeném mimopecním zpracování u většiny z nich výrazně

nemění a proto byl jejich vliv na obsah Oox v tekutém kovu vyhodnocen jako statisticky nevýznamný.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu obsahu chemického složení na obsah Oox v tavenině po mimopecním zpracování (očkování, modifikaci s následným očkováním), je možné sestavit regresní rovnici (74).

$$\text{Oox} = - 18,12 - 53,86 \text{ Si} + 752,91 \text{ Mg} + e \quad (74)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku v tekutém kovu (ppm)

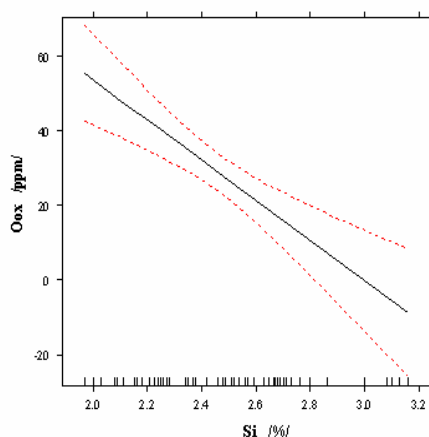
Si ... obsah křemíku (%)

Mg...obsah hořčíku (%)

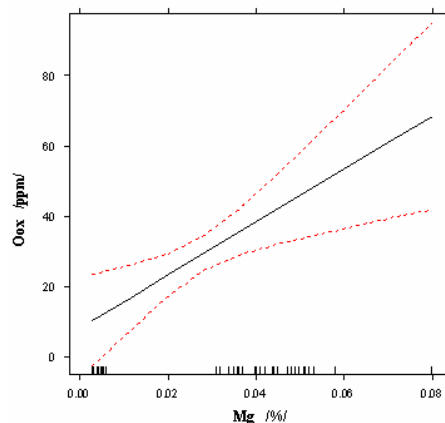
e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv obsahu křemíku a hořčíku na obsah Oox, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázku č.22 a 23.

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu



Obr.č.22: Vliv obsahu křemíku
na obsah Oox



Obr.č.23: Vliv obsahu hořčíku
na obsah Oox

Test č.7 – Vliv teplotních podmínek na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu teploty na obsah Oox při mimopecním zpracování tekutého kovu byl proveden test č.7.

Tab.č.27: Koeficienty t-testu vlivu teploty mimopecního zpracování na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 669,1698	223,2803	- 2,997	0,00396
t_p	0,4913	0,1572	3,125	0,00274 **

Tab.č.28: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma	Průměrný čtverec	Hodnota	Hodnota

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

		čtverců		F	p
t_p	1	4585,5	4585,5	9,7684	0,002735 **

Z výsledků testu č.7, které jsou uvedeny v tabulce č.27 a 28, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv teploty na obsah Oox v tekutém kovu při mimopecním zpracování. Se snižující se teplotou se obsah Oox v tekutém kovu snižuje, respektive čím nižší byla teplota odběru vzorku pro určení obsahu Oox, tím méně Oox bylo ve vzorku stanoveno. Výsledek tohoto testu odpovídá teoretickému předpokladu, kdy se snižující se teplotou se snižuje i rozpustnost plynů v kovu a tím by se v tekutém kovu neměl zvyšovat obsah Oox. Příčinou tohoto výsledku může být skutečnost, že s klesající teplotou probíhá méně chemických reakcí mezi kyslíkem a ostatními prvky přítomnými v tavenině a tím i méně Oox se potom při následné analýze ve vzorku nachází.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu teploty při mimopecním zpracování na obsah Oox v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (75).

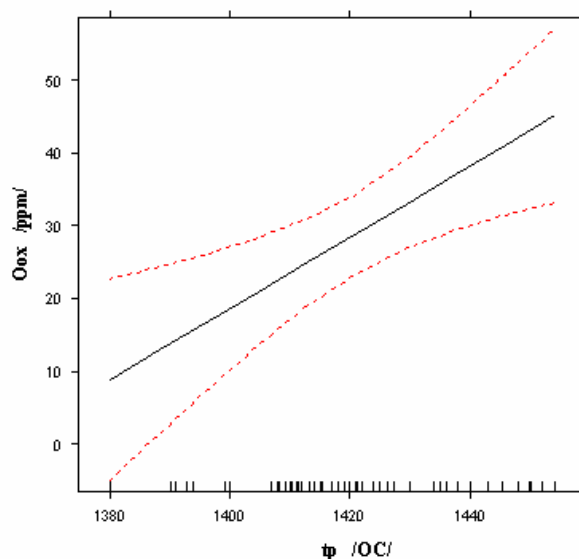
$$\text{Oox} = - 669,1698 + 0,4913 t_p + e \quad (75)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku v tekutém kovu (ppm)

t_p ... teplota tekutého kovu po provedeném očkovaní nebo modifikaci ($^{\circ}\text{C}$)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv teploty tekutého kovu obsahu křemíku a hořčíku na obsah Oox, tak jak ji na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, je na obrázku č.24.



Obr.č.24: Vliv teploty na obsah Oox v tekutém kovu
při mimopecním zpracování

8.1.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku

8.1.2.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při tavení

Test č.8 - Vliv chemického složení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu chemického složení sledovaných prvků - uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, síry, chromu, manganu a hliníku - na obsah dusíku při tavení byl proveden test č.8.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu dusíku dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky,

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě, přičemž teplota při odběru prvního vzorku byl zpravidla nižší, než při odběru vzorku druhého.

Tab.č.29: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	109,749	53,086	2,067	0,04105
C	- 17,565	12,680	- 1,385	0,16878
Si	4,502	2,642	1,704	0,09122
Mn	76,458	16,381	4,668	8,65e-06 ***
P	- 399,312	126,962	- 3,145	0,00214 **
S	214,660	350,452	0,613	0,54146
Cr	468,032	243,560	1,922	0,05724 *
Mg	- 2871,740	3763,634	- 0,763	0,44708
Al	1156,865	507,615	2,279	0,02460 *

Tab.č.30: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma	Hodnota	Hodnota

VŠB-TU Ostrava, FMFI, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

		čtverců	F	p
C	1	16546	26,7258	1,059e-06 ***
Si	1	11015	17,7923	5,080e-05 ***
Mn	1	9808	15,8425	0,0001238 ***
P	1	19864	32,0848	1,195e-07 ***
S	1	790	1,2766	0,2609936
Cr	1	3981	6,4299	0,0126261 *
Mg	1	396	0,6404	0,4252817
Al	1	3216	5,1939	0,0245959 *

Z výsledků testu č.8, které jsou uvedeny v tabulce č.29 a 30, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obsahu uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, chromu a hliníku na obsah dusíku v litině při tavení. Se snižujícím se obsahem uhlíku a fosforu se zvyšuje obsah dusíku, se snižujícím se obsahem křemíku, manganu, chromu a hliníku se obsah dusíku snižuje. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu jen z části, neboť dle podkapitoly 3.5 (obr.č.6) by mělo docházet:

- se snižujícím se obsahem uhlíku, křemíku a hliníku ke zvyšování obsahu dusíku
- a se snižujícím se obsahem manganu a chromu ke snižování obsahu dusíku v kovu.

Z výsledku testu vidíme, že vliv u uhlíku, manganu a chromu je opačný, kdy: - se zvyšujícím se obsahem uhlíku se snižuje obsah dusíku

-se snižujícím se obsahem manganu a chromu se obsah dusíku v litině snižuje.

Příčinou tohoto výsledku může být výraznější změna v chemickém složení, zejména u uhlíku (propal, nauhličení) a následně také vzájemné chemické reakce mezi jednotlivými sledovanými prvky.

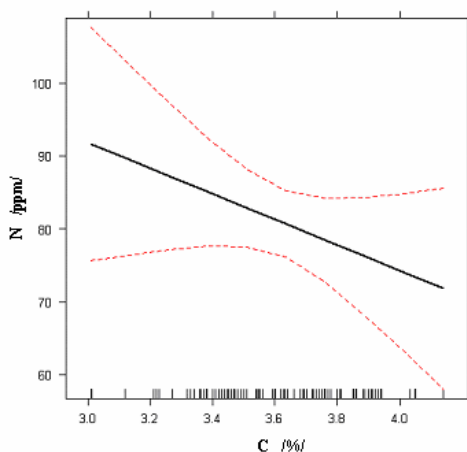
Vliv síry a hořčíku nemá statisticky významný vliv na obsah dusíku při tavení. Příčinou tohoto výsledku může být skutečnost, že hodnota obsahu dusíku v závislosti na obsahu těchto dvou prvků se výrazně neměnila a proto byl tento jejich vliv vyhodnocen jako statisticky nevýznamný.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu chemického složení na obsah dusíku v tekutém kovu, je možné sestavit regresní rovnici (76).

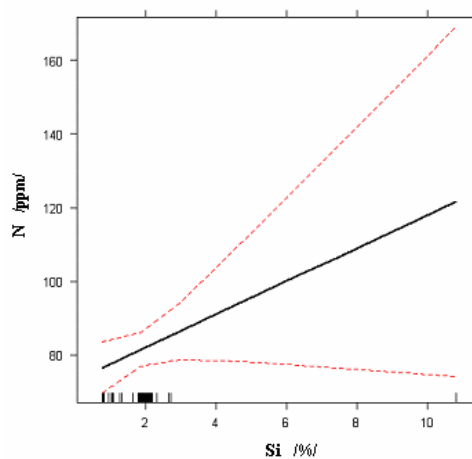
$$N = 109,749 - 17,565 C + 4,502 Si + 76,458 Mn - 399,312 P + 468,032 Cr + \\ + 1156,8654 Al + e \quad (76)$$

kde: N ... obsah dusíku (ppm)	P ... obsah fosforu (%)
C ... obsah uhlíku (%)	Cr ... obsah chromu (%)
Si ... obsah křemíku (%)	Al ... obsah hliníku (%)
Mn ... obsah manganu (%)	e ... modelem nevysvětlitelná chyba

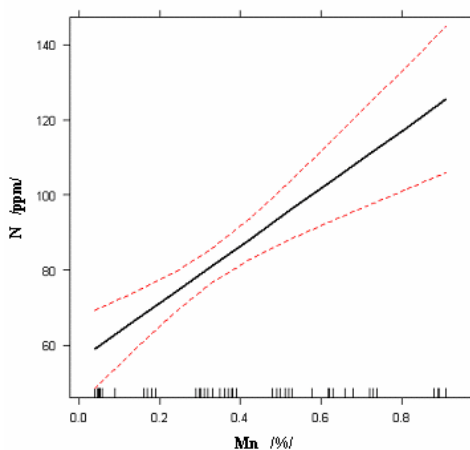
Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující statisticky významný vliv sledovaných prvků na obsah dusíku, tak jak je na základě naměřených hodnot predikuje regresní model, jsou na obrázcích č.25-30.



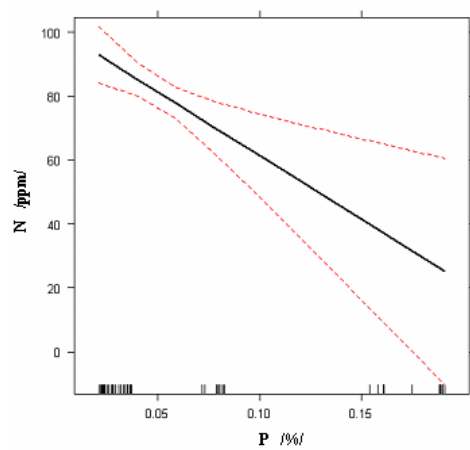
Obr.č.25: Vliv uhlíku na obsah dusíku



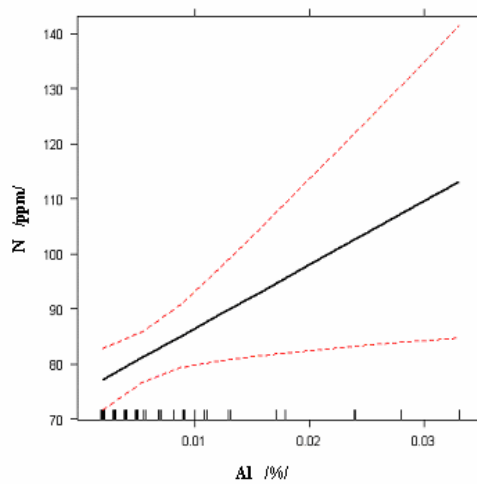
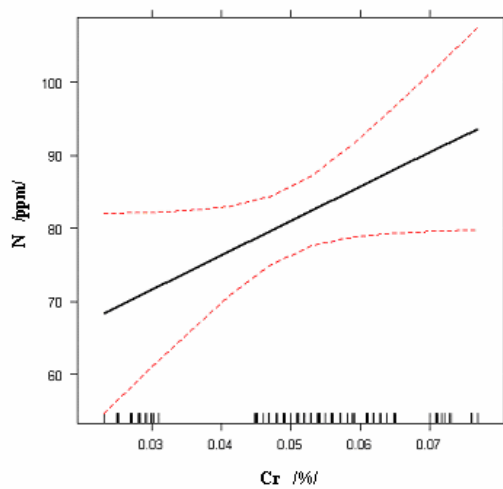
Obr.č. 26: Vliv křemíku na obsah dusíku



Obr.č.27: Vliv manganu na obsah dusíku



Obr.č.28: Vliv fosforu na obsah dusíku



Obr.č.29: Vliv chromu na obsah dusíku

Obr.č. 30: Vliv hliníku na obsah dusíku

Test č.9 - Vliv časové prodlevy na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu časové prodlevy při tavení na obsah dusíku byl proveden test č.9.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu plynů v tavenině dva vzorky. První vzorek, řada označená I, byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek, řada označená II, byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.31: Koeficienty t-testu vlivu časové prodlevy při tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	89,2844	6,4238	13,899	< 2e-16
čas	- 1,2937	0,7457	- 1,735	0,0872

Tab.č.32: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
čas	1	3208	3,0101	0,08725

Z výsledků testu č.9, které jsou uvedeny v tabulce č. 31 a 32, vyplývá, že časová prodleva při tavení nemá statistický významný vliv na obsah dusíku v tekutém kovu,

respektive nebylo prokázáno, že držení taveniny v peci v rozsahu od 2 do 20 minut má pozitivní či negativní vliv na hodnotu obsahu dusíku v tekutém kovu.

Dle teoretického předpokladu jsem očekávala, že bude prokázána závislost mezi obsahem plynu v tavenině a časovou prodlevou, neboť čím déle je tekutý kov v peci, tím více plynu by v něm mělo být rozpuštěno. Výsledek testu tomuto předpokladu neodpovídá a jeho příčinu můžeme spatřovat v:

- rychlém natavení vsázky a odběru tekutého kovu z tavícího agregátu
- koncentraci dusíku, kdy nebyl výrazný rozdíl mezi obsahem dusíku v tavenině, strusce a pecní atmosféře a proto nedocházelo ani k výrazným změnám v jeho obsahu.

Test č.10 – Vliv teplotních podmínek tavení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu teploty tavení na obsah dusíku při tavení byl proveden test č.10. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu plynů v tavenině dva vzorky. První vzorek, řada označená I, byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek, řada označená II, byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.33: Koeficienty t-testu vlivu teploty tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	443,4794	868,2385	0,5110	0,6105
t_p	- 0,5598	0,0770	- 7,271	4,67e-11 ***

Tab.č.34: ANOVA testovaného modelu

VŠB-TU Ostrava, FMML, Katedra slévárenství
Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
t_p	1	17834	22,7159	5,539e-06 ***

Z výsledků testu č.10, které jsou uvedeny v tabulce č.33 a 34, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv teploty tavení na obsah dusíku v tavenině, tzn. že v rozsahu naměřených teplot tavení (1374-1580 °C), bylo prokázáno, že se zvyšující se teplotou tavení se snižuje obsah dusíku v tavenině.

Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu, neboť se zvyšující se teplotou by se měla zvyšovat i rozpustnost plynů v tekutém kovu a tím také i jeho obsah v tavenině.

Příčinou tohoto výsledku mohou být chemické reakce mezi dusíkem a např. hliníkem (AlN), hořčíkem (Mg₃N₂) a kyslíkem (oxidy dusíku), kdy vznikající produkty odcházejí do strusky nebo do pecní atmosféry, čímž dochází ke snížení obsahu dusíku v litině.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu teploty při mimopecním zpracování na obsah dusíku v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (77).

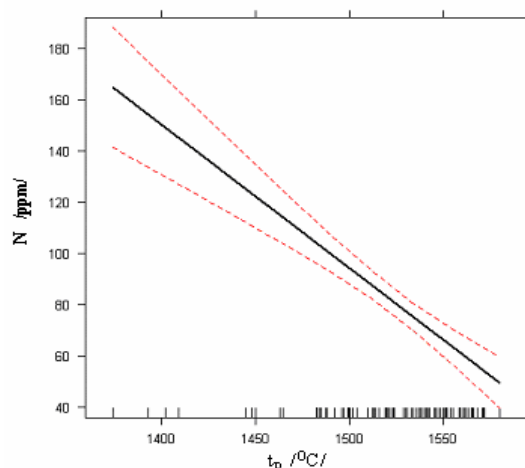
$$N = 443,4794 - 0,5598 t_p + e \quad (77)$$

kde: **N**... obsah dusíku (ppm)

t_p ... teplota tekutého kovu při tavení (°C)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv teploty tavení na obsah dusíku, tak jak ji na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, je na obrázku č.31.



Obr.č.31: Vliv teploty tavení na obsah dusíku

Test č.11 – Vliv tlakových podmínek při tavení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku oxidu uhelnatého při tavení na obsah dusíku byl proveden test č.11.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu dusíku dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě, přičemž teplota při odběru prvního vzorku byl zpravidla nižší, než při odběru vzorku druhého.

Tab.č.35: Koeficienty t-testu vlivu tlaků při tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 37,819	34,633	- 1,092	0,277
$p_{(m+a)}$	125,760	22,959	5,477	2,54e-07 ***
$p_{co} (tp)$	- 33,604	5,849	- 5,745	7,53e-08 ***

Tab.č.36: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
$p_{(m+a)}$	1	26683	37,146	1,472e-08 ***
$p_{co (tp)}$	1	23709	33,006	7,529e-08 ***

Z výsledků testu č.11, které jsou uvedeny v tabulce č.35 a 36, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obou tlaků na obsah dusíku v tavenině, tzn. že bylo prokázáno, že se zvyšující se hodnotou součtu metalostatického a atmosférického tlaku se hodnota obsahu dusíku v tekuté litině zvyšuje, naopak se zvyšující se hodnotou parciálního tlaku oxidu uhelnatého se obsah dusíku v tavenině snižuje.

Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu, kdy se v případě výsledku vlivu součtu metalostatického a atmosférického tlaku potvrdila platnost Sievertsova zákona - se zvyšující se hodnotou tlaku se zvyšuje také množství rozpuštěného plynu v kovu. Tzn. čím větší bude hodnota tohoto součtu, tím lepší podmínky budou vytvořeny pro pohlcování dusíku taveninou až do doby vyrovnání vzájemných koncentrací. V případě vlivu parciálního tlaku oxidu uhelnatého na obsah dusíku (v tavenině se zvyšuje obsah kyslíku), může docházet k vzájemným chemickým reakcím mezi dusíkem, kyslíkem a ostatními prvky a tím také ke snížení obsahu dusíku v tekuté litině.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu obou tlaků na obsah dusíku v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (78).

$$N = - 37,819 + 125,760 p_{(a+m)} - 33,604 p_{co (tp)} + e \quad (78)$$

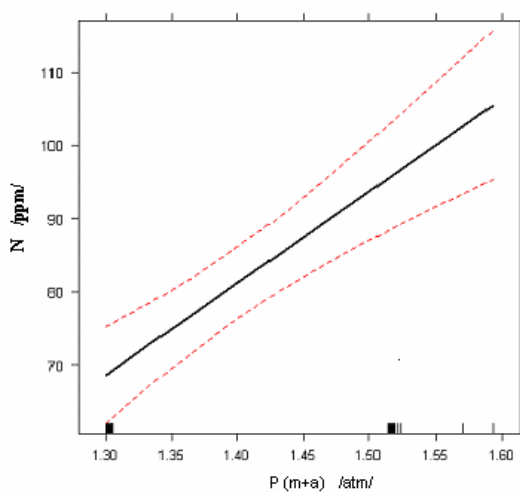
kde: **N**... obsah dusíku (ppm)

$p_{(a+m)}$ hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku (atm)

$p_{co (tp)}$... hodnota parciálního tlaku oxidu uhelnatého při teplotě tavení (atm)

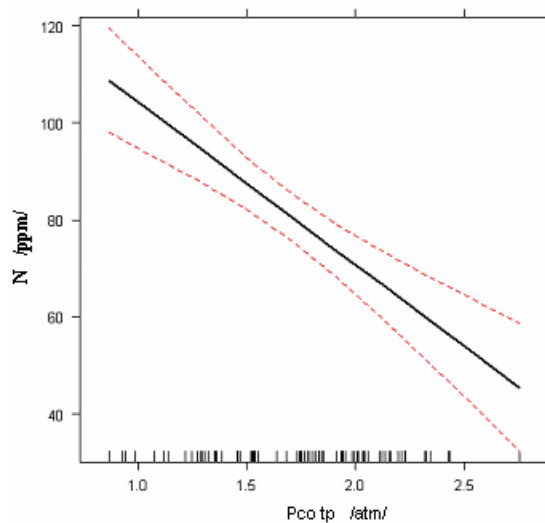
e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku oxidu uhelnatého při teplotě tavení na obsah dusíku, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.32 a 33.



Obr.č.32: Vliv metalostatického

a atmosférického tlaku na obsah dusíku



Obr.č.33: Vliv parciálního tlaku CO

při teplotě tavení na obsah dusíku

8.1.2.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při mimopecním zpracování

Test č.12 – Vliv chemického složení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, síry, chromu, hořčíku a hliníku na obsah dusíku při procesu očkování nebo procesu modifikace s následným očkováním tekutého kovu, byl proveden test č.12.

Tab.č.37: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	73,257	58,737	1,247	0,2179
C	7,452	16,022	0,465	0,64380
Si	- 27,848	8,997	- 3,095	0,00316 **
Mn	49,521	13,113	3,776	0,00041 ***
P	- 263,541	94,635	- 2,785	0,00745 **
S	692,997	283,978	2,440	0,01812 *
Cr	253,718	173,741	1,460	0,15022
Mg	868,763	199,533	4,354	6,29e-05 ***
Al	- 785,931	321,429	- 2,445	0,01790 *

Tab.č.38: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	2383,8	11,4675	0,0013556 **
Si	1	4725,5	22,7325	1,543e-05 ***
Mn	1	8171,0	39,3077	7,206e-08 ***
P	1	2050,0	9,8618	0,0027821 **
S	1	1187,8	5,7142	0,0204849 *

Cr	1	904,7	4,3523	0,0418822 *
Mg	1	2750,0	13,2293	0,0006331 ***
Al	1	1242,8	5,9786	0,0179042 *

Z výsledků testu č.12, které jsou uvedeny v tabulce č.37 a 38, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv všech sledovaných prvků na obsahu dusíku v litině při tavení.

Se zvyšujícím se obsahem uhlíku, manganu, síry, chromu a hořčíku se zvyšuje obsah dusíku, se zvyšujícím se obsahem křemíku, fosforu a hliníku se naopak obsah dusíku snižuje. Jako statisticky nejvýraznější vliv na obsah dusíku má křemík, mangan a hořčík. Výsledek testu odpovídá teoretickému předpokladu jen z části a při porovnání výsledku tohoto testu s testem vlivu chemického složení na obsah Oox při mimopecním zpracování vidíme, že křemík a hořčík mají stejný vliv na obsah Oox i dusíku. Příčinou tohoto výsledku může být právě proces očkování a proces modifikace s následným očkováním, kdy dochází k výrazným změnám právě v obsahu hořčíku, křemíku, uhlíku a hliníku. Proces modifikace můžeme popsat jako velmi bouřlivou reakci, při níž dochází k výrazným teplotním a tlakovým změnám. A právě těmito teplotním a tlakovým změnám, respektive vývinu hořčíkových par, připisují vliv na hodnotu obsahu dusíku v tekutém kovu, neboť jejich vznikem by mohlo docházet ke snížení obsahu dusíku v tavenině a protože hladina kovu není po provedeném mimopecním zpracování výrazně chráněna před stykem s okolní atmosférou, v níž se dusík nachází ve vyšší koncentraci než v tavenině, může docházet k opětovnému pohlcování dusíku tekutým kovem, čímž se vzájemně vyrovnávají jeho koncentrace mezi kovem a okolním prostředím. Z teoretického hlediska jsem očekávala silnější závislost vlivu obsahu hliníku. Vliv ostatních prvků připisují zejména skutečnosti, že se obsah dusíku při mimopecním zpracování, z hlediska vlivu chemického složení, mění velmi výrazně (obsah dusíku v řádu jednotek ppm, obsahy manganu, chromu, síry, fosforu ... v řádu setin a tisícín procenta) a proto byl vliv všech sledovaných prvků určen jako statisticky významný.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu chemického složení při mimopecním zpracování na obsah dusíku v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (79).

$$N = 73,257 + 7,452 C - 27,848 Si + 49,521 Mn - 263,541 P + 692,997 S +$$

$$+ 253,718 \text{ Cr} + 868,763 \text{ Mg} - 785,931 \text{ Al} + e \quad (79)$$

kde: **N** ... obsah dusíku (ppm)

S ... obsah síry (%)

C ... obsah uhlíku (%)

Cr ... obsah chromu (%)

Si ... obsah křemíku (%)

Mg ... obsah hořčíku (%)

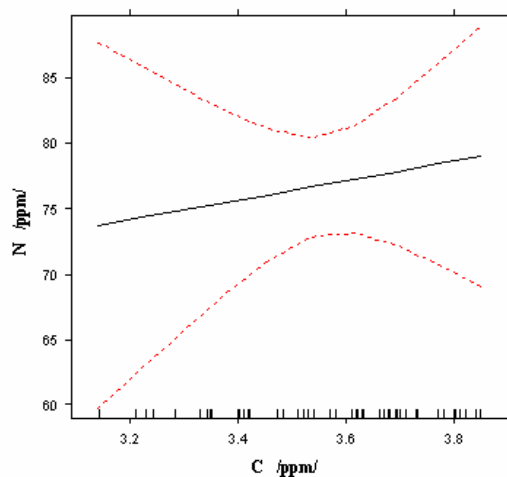
Mn ... obsah manganu (%)

Al ... obsah hliníku (%)

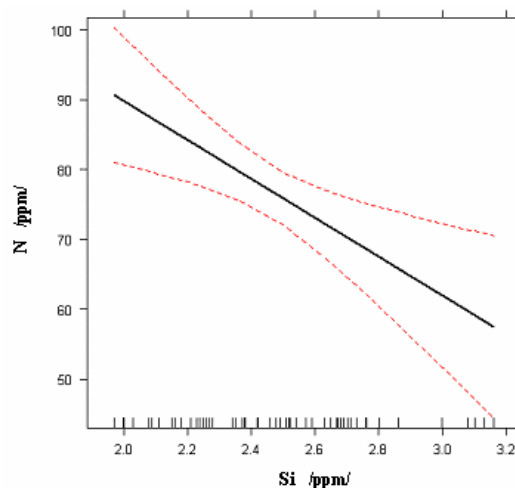
P ... obsah fosforu (%)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

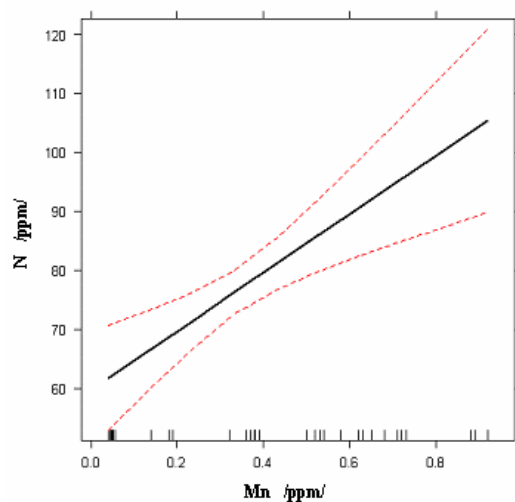
Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly, znázorňující vliv chemického složení (C, Si, Mn, P, S, Cr, Mg a Al) na obsah dusíku, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.34-41.



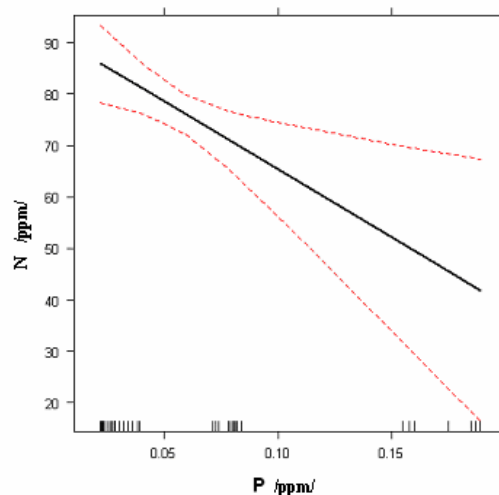
Obr.č.34: Vliv uhlíku na obsah dusíku



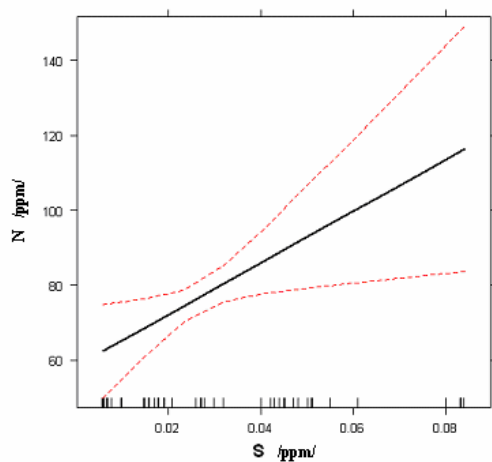
Obr.č.35: Vliv křemíku na obsah dusíku



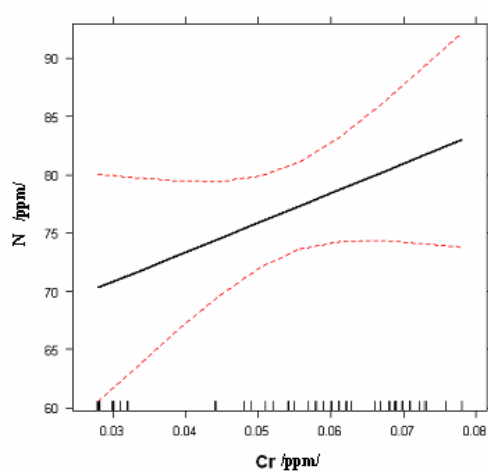
Obr.č.36: Vliv manganu na obsah dusíku



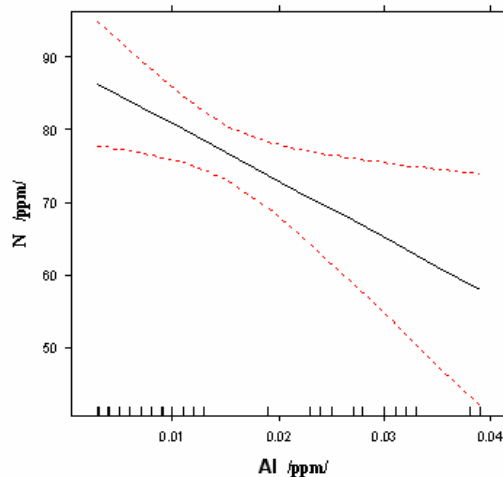
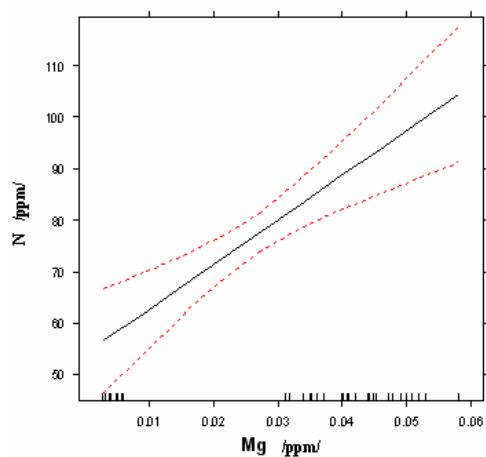
Obr.č.37: Vliv fosforu na obsah dusíku



Obr.č.38: Vliv síry na obsah dusíku



Obr.č.39: Vliv chromu na obsah dusíku



Test č.13 – Vliv teplotních podmínek na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu teploty na obsah dusíku při mimopecním zpracování tekutého kovu byl proveden test č.13.

Tab.č.39: Koeficienty t-testu vlivu teploty mimopecního zpracování na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	416,7560	246,8274	1,688	0,0966
t_p	0,2394	0,1738	- 1,377	0,1737

Tab.č.40: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
t_p	1	1066	1,8965	0,1737

Z výsledků testu č.13, které jsou uvedeny v tabulce č.39 a 40, vyplývá, že teplota nemá statisticky významným vliv na obsah dusíku v tekutém kovu při mimopecním zpracování.

Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu, neboť dle podkapitoly 3.5 obr.č.5 je teplota jedním z důležitých faktorů mající vliv na rozpustnost dusíku v tekutém kovu. Příčinu výsledku tohoto testu můžeme spatřovat ve skutečnosti, že hodnoty obsahu dusíku v závislosti na hodnotě teploty po provedeném mimopecním zpracování se výrazně neliší a proto byly určeny jako statisticky nevýznamné.

8.1.3 Výsledky statistického zpracování pro technologii elektrických

indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí

Pro zjištění vlivu sledovaných parametrů na obsah Oox a dusíku, u sléváren využívající pro tavení IPSF, bylo provedeno celkem 12 testů. Výsledky těchto testů prokázaly, že na :

- obsah **Oox** má signifikantní vliv:

- při tavení – uhlík, chrom, hořčík, hliník, časová prodleva, teplota tavení a parciální tlak oxidu uhelnatého
- při mimopecním zpracování – křemík, hořčík a teplota.

- na obsah **dusíku** má signifikantní vliv:

- při tavení – uhlík, křemík, mangan, fosfor, chrom, hliník, teplota tavení, parciální tlak oxidu uhelnatého a hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku
- při mimopecním zpracování – křemík, mangan, fosfor, síra, hořčík a hliník.

Ostatních sledované faktory, ať již při tavení nebo mimopecním zpracování nemají statisticky významný vliv na obsah Oox a dusíku. Výsledky provedených testů č.2-13, pro technologii IPSF, jsou uvedeny tabulce č.41.

Tab.č.41: Výsledky statistického zpracování pro technologii IPSF

I P S F			
tavení		mimopecní zpracování	
Oox	N	Oox	N

Sledovaný parametr	Chemické složení	C	***	***	0	0
		Si	0	***	***	**
		Mn	0	***	0	***
		P	0	***	0	**
		S	0	0	0	*
		Cr	***	*	0	0
		Mg	*	0	***	***
		Al	*	*	0	*
	Čas	t	*	0	/	/
	Teplota	t _p	*	***	**	0
		t _R	0	/	/	/
		t _{PUV}	0	/	/	/
	Tlak	p _(m+a)	0	***	/	/
		p _{CO} (t _p)	*	***	/	/

vysvětlivky: * - vliv sledovaného parametru statisticky významný,

** - vliv sledovaného parametru statisticky více významný,

*** - vliv sledovaného parametru statisticky velmi významný,

0 – vliv sledovaného parametru statisticky neprokázán,

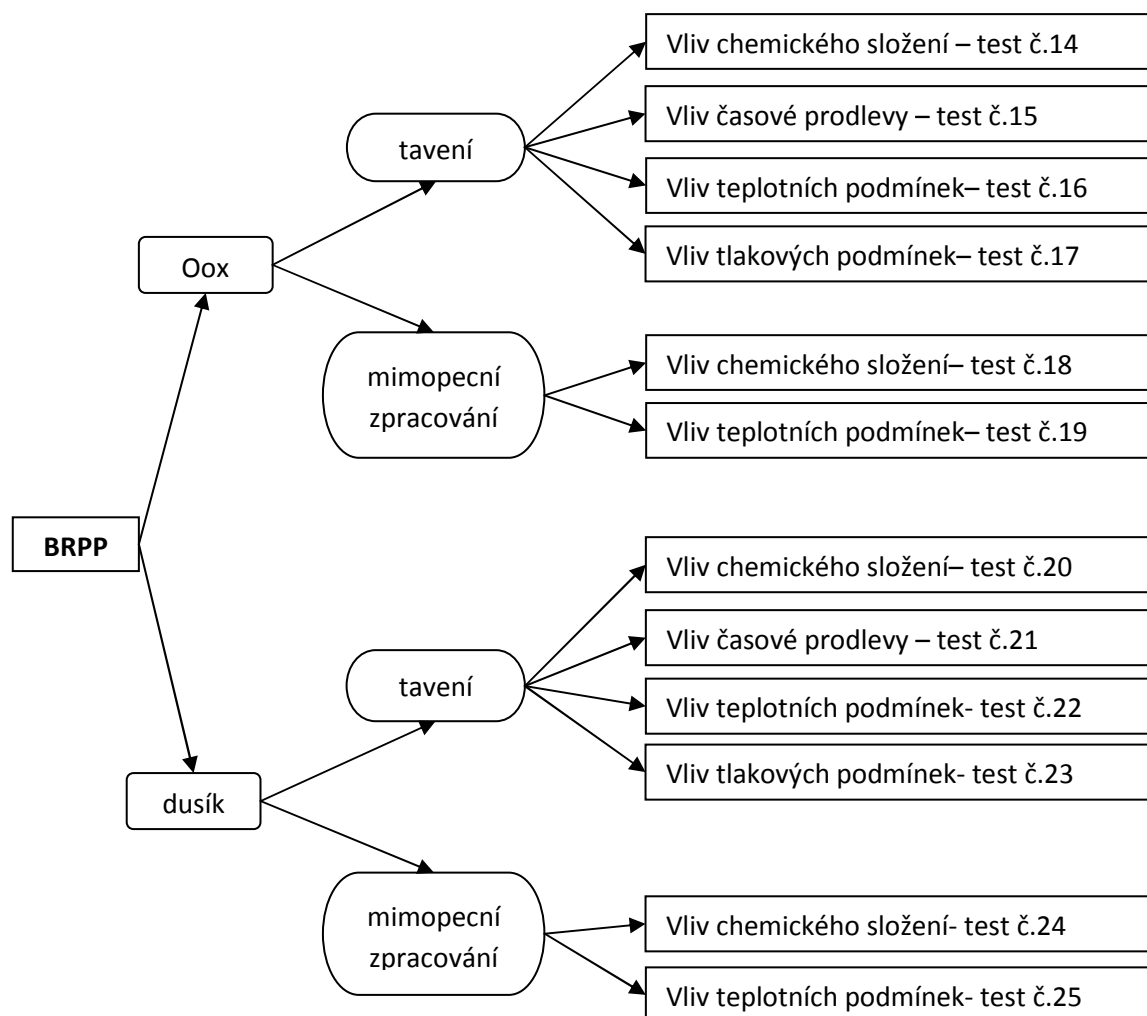
/ - test vlivu sledovaného parametru neprováděn

8.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah plynů u bubnových rotačních

plynových pecí

Pro zjištění vlivu sledovaných parametrů na obsah Oox a dusíku v litině u slévárny používající pro výrobu tekutého kovu bubnové rotační plynové pece bylo provedeno celkem 12 testů. Jejich rozdělení je uvedeno v následujícím obrázku č.42.

Obr.č.42: Schematické znázornění provedených testů u technologie BRPP



8.2.1. Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox**8.2.1.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při tavení****Test č.14 – Vliv chemického složení na obsah Oox**

Pro určení průkaznosti vlivu sledovaného chemického složení na obsah Oox při tavení byl proveden test č.14. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.42: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 7,587	55,655	- 0,136	0,8925
C	11,076	6,152	1,800	0,0822
Si	- 2,406	6,237	- 0,386	0,7025
Mn	104,283	166,762	0,625	0,5366
P	- 927,760	1332,032	- 0,696	0,4917
S	- 2271,837	2049,201	- 1,109	0,2767
Cr	3260,112	1995,245	1,634	0,1131
Mg	- 4790,527	1791,075	- 2,675	0,0122 *
Al	2322,467	2550,786	0,910	0,3701

Tab.č.43: ANOVA testovaného modelu

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	62,62	1,5516	0,22287
Si	1	9,97	0,2470	0,62298
Mn	1	196,99	4,8807	0,03521 *
P	1	11,56	0,2863	0,59668
S	1	43,26	1,0718	0,30910
Cr	1	116,51	2,8866	0,10002
Mg	1	261,48	6,4786	0,01650 *
Al	1	33,46	0,8290	0,37007

Z výsledků testu č.14, které jsou uvedeny v tabulce č.42 a 43, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obsahu manganu a hořčíku při tavení na obsah Oox v tavenině, tj. bylo statisticky prokázáno, že se zvyšujícím se obsahem manganu se zvyšuje také obsah Oox v tavenině a naopak se zvyšujícím se obsahem hořčíku se obsah Oox v tekutém kovu snižuje. U ostatních sledovaných prvků nebyl prokázán statisticky významný vliv na obsah Oox při tavení.

Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu jen u hořčíku, kdy čím více hořčíku bude tavenina obsahovat, tím více se bude tvořit MgO, který vyplouvá do strusky a tím méně Oox se potom bude v tavenině vyskytovat. U vlivu manganu na obsah Oox jsem očekávala stejný výsledek jako u hořčíku, který se bohužel nepotvrdil, neboť dle výsledku tohoto testu čím více manganu tavenina obsahovala, tím více obsahovala i Oox. Příčinu tohoto výsledku spatřuji ve skutečnosti, že z hlediska obsahu manganu byly naměřeny výrazné rozdíly, které byly dle statistického zpracování vyhodnoceny jako významné z pohledu obsahu Oox. Z výsledku testu jsem také očekávala, že se projeví zejména vliv křemíku a uhlíku na obsah Oox v tavenině, neboť oba prvky při tavení výrazně mění svůj obsah.

U ostatních sledovaných prvků nebyl prokázán statisticky významný vliv na obsah Oox při tavení a příčinou tohoto výsledku může být právě velikost změny jejich obsahu, která nebyla, z pohledu vlivu na změnu obsahu Oox, vyhodnocena jako statisticky významná.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu chemického složení na obsah Oox v tavenině v peci je možné sestavit regresní rovnici (80).

$$\text{Oox} = - 7,587 + 104,283 \text{ Mn} - 4790,527 \text{ Mg} + e \quad (80)$$

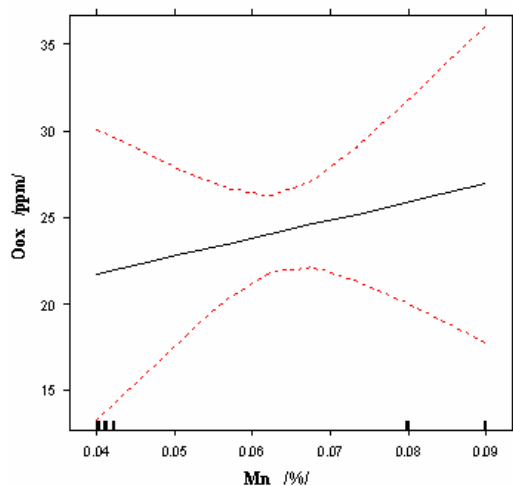
kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku (ppm)

Mn ... obsah manganu (%)

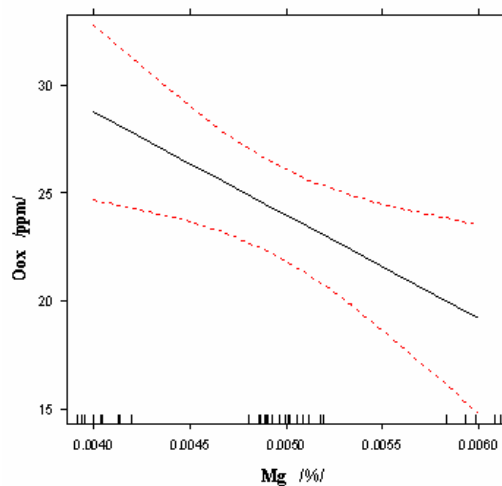
Mg ... obsah hořčíku (%)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv manganu a hořčíku na obsah Oox, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.43 a 44.



Obr.č.43: Vliv manganu na obsah Oox



Obr.č.44: Vliv hořčíku na obsah Oox

Test č.15 - Vliv časové prodlevy na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu časové prodlevy při tavení v BRPP na obsah Oox byl proveden test č.15.

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.44: Koeficienty t- testu vlivu časové prodlevy při tavení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	20,622	3,938	5,237	4e-08
čas	1,421	1,548	0,918	0,370

Tab.č.45: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
čas	1	8,786	0,8428	0,3695

Z výsledků testu č.15, které jsou uvedeny v tabulce č.44 a 45, vyplývá, že časová prodleva při tavení v bubnových rotačních plynových pecích nemá statisticky významný vliv na obsah Oox v tekutém kovu. Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být :

- rychlý odběr tekutého kovu z pecního zařízení a minimální prostoje při jeho následném zpracování
- vyrovnané koncentrace kyslíku mezi taveninou, struskou a pecní atmosférou
- obsah Oox se v závislosti na hodnotě časové prodlevy výrazně neměnil a proto byl vyhodnocen jako statisticky nevýznamný.

Test č.16 – Vliv teplotních podmínek tavení na obsah Oox

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Pro určení průkaznosti vlivu teploty tavení, rovnovážné teploty a teploty počátku uhlíkového varu na obsah Oox při tavení byl proveden test č.16.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.46: Koeficienty t-testu vlivu teplotních podmínek při tavení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	47,40053	233,84345	0,203	0,841
t_p	0,02450	0,14201	0,173	0,864
t_R	- 0,4203	0,24587	- 0,171	0,865
t_{PUV}	- 0,6321	0,26771	-0,168	0,905

Tab.č.47: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
t_p	1	0,22	0,0041	0,9494
t_R	1	1,59	0,0292	0,8652
t_{PUV}	1	2,34	0,0465	0,6533

Z výsledků testu č.16, které jsou uvedeny v tabulce č.46 a 47, vyplývá, že žádná ze sledovaných teplot nemá statisticky významný vliv na obsah Oox při tavení.

Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být skutečnost, že tavenina v peci byla vždy před každým dalším odběrem ohřívána na teplotu cca 1550°C. Z tohoto důvodu byl rozdíl obsahu Oox vzhledem k hodnotám sledovaných teplot vyhodnocen jako statisticky nevýznamný.

Test č.17 – Vliv tlakových podmínek tavení na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku oxidu uhelnatého při tavení na obsah Oox byl proveden test č.17. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu Oox dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.48: Koeficienty t-testu vlivu tlaků při tavení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 126,208	48,066	- 2,626	0,0126
$p_{(m+a)}$	97,170	97,170	39,269	0,0185 *
$p_{co}(tp)$	14,461	30,914	0,468	0,6429

Tab.č.49: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
$p_{(m+a)}$	1	235,27	5,4938	0,02507 *
$p_{co}(tp)$	1	214,26	5,0033	0,03197 *

Z výsledků testu č.17, které jsou uvedeny v tabulce č.48 a 49, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obou sledovaných tlaků na obsah Oox v tekutém kovu, tzn., že se zvyšující se hodnotou součtu metalostatického a atmosférického tlaku se bude zvyšovat i obsah Oox, se zvyšující se hodnotou parciálního tlaku oxidu uhelnatého se bude zvyšovat i obsah Oox v tavenině.

Výsledek testu odpovídá teoretickému předpokladu, kdy se zvyšující se hodnotou tlaku se zvyšuje rozpustnost daného plynu v kovu a tím také jeho obsah. Možné vysvětlení této skutečnosti

můžeme vidět ve vytvoření optimálních podmínek při tavení a ve způsobu výpočtu obou hodnot sledovaných tlaků.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu tlakových podmínek na obsah Oox v tavenině v peci je možné sestavit regresní rovnici (81).

$$\text{Oox} = -126,208 + 97,170 p_{\text{CO (m+a)}} + 14,461 p_{\text{CO (tP)}} + e \quad (81)$$

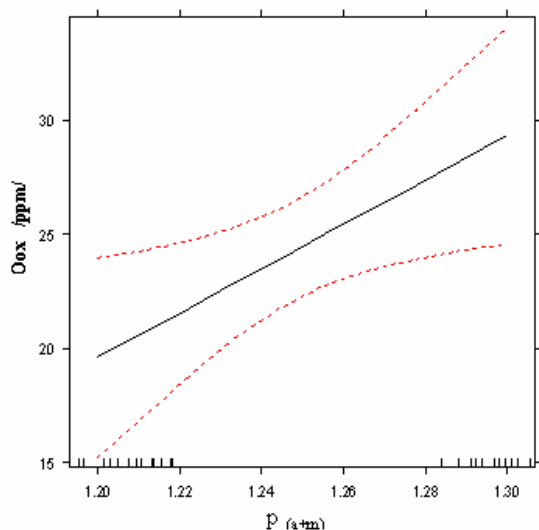
kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku (ppm)

p_(m+a) ... hodnota metalostatického a atmosferického tlaku (atm)

p_{CO (tP)} ... hodnota parciálního tlaku při teplotě tavení (atm)

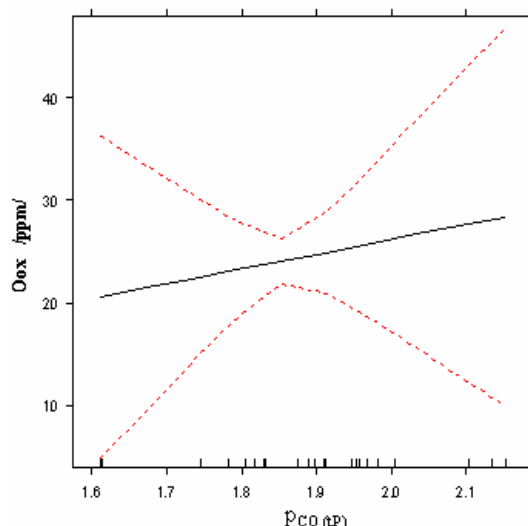
e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku oxidu uhelnatého při teplotě tavení na obsah Oox, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.45 a 46.



Obr.č.45 : Vliv metalostatického

a atmosferického tlaku na obsah Oox



Obr.č.46 : Vliv parciálního tlaku CO

na obsah Oox

8.2.1.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah Oox při mimopecním

zpracování

Z druhé skupiny dat souboru A, tedy z dat, které se týkají výhradně mimopecního zpracování tekutého kovu (řady dat označené III, IV, V a VI), byly provedeny celkem 2 testy (test č.18 a 19).

Test č.18 – Vliv chemického složení na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu chemického složení (uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, síry, chromu, manganu a hliníku) na obsah Oox při mimopecním zpracování byl proveden test č.18.

Tab.č.50: Koeficienty t- testu vlivu chemického složení na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	23,201	183,243	0,127	0,901
C	12,960	9,817	1,320	0,210
Si	- 9,515	24,494	- 0,388	0,704
Mn	74,690	514,421	0,145	0,887
P	1307,173	2998,580	0,436	0,670
S	- 5972,421	3410,532	- 1,751	0,103
Cr	- 2580,515	5882,438	- 0,439	0,668
Mg	- 515,178	581,250	- 0,886	0,392
Al	396,017	2553,251	0,155	0,879

Tab.č.51: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	24,04	0,4212	0,52765
Si	1	316,92	5,5527	0,03481 *
Mn	1	46,44	0,8137	0,38345
P	1	12,40	0,2173	0,64881
S	1	136,88	2,3983	0,14546
Cr	1	44,83	0,7855	0,39157
Mg	1	44,97	0,7878	0,39088

Al	1	1,37	0,0241	0,87912
----	---	------	--------	---------

Z výsledků testu č.18, které jsou uvedeny v tabulce č.50 a 51, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obsahu křemíku na obsah Oox v tekuté litině při mimopecním zpracování, kdy se zvyšujícím se obsahem křemíku se mírně snižuje obsah Oox v tekutém kovu po provedeném očkování nebo modifikaci s následným očkováním. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být chemická reakce při procesu očkování, kdy se v tekutém kovu záměrně zvyšuje obsah křemíku. Ten pak reaguje s kyslíkem za vzniku SiO_2 , který vyplouvá na hladinu tekutého kovu do strusky, čímž dochází ke snížení Oox v tavenině

Ostatní sledované prvky – uhlík, mangan, fosfor, síra, chrom, hořčík a hliník – nemají na obsah Oox při mimopecním zpracování statisticky významný vliv. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být nevýrazný rozdíl obsahu Oox v závislosti na změně obsahu těchto prvků.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu obsahu chemického složení na obsah Oox v tavenině po mimopecním zpracování (očkování, modifikaci s následným očkováním) je možné sestavit regresní rovnici (82).

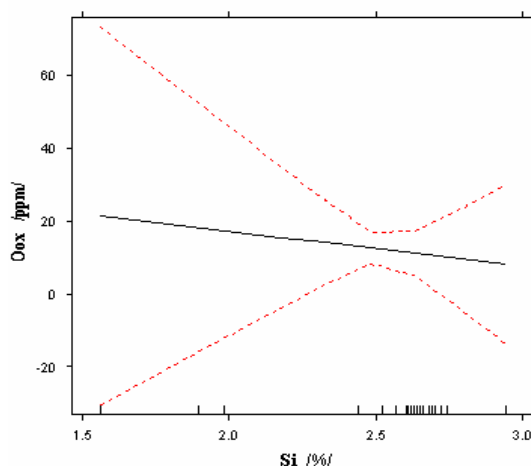
$$\text{Oox} = 23,201 - 9,515 \text{ Si} + e \quad (82)$$

kde: **Oox** ... celkový obsah kyslíku v tekutém kovu (ppm)

Si ... obsah křemíku (%)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv obsahu křemíku na obsah Oox, tak jak ji na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, je na obrázku č.47.

**Obr.č.47:** Vliv obsahu křemíku na obsah Oox**Test č.19** – Vliv teplotních podmínek na obsah Oox

Pro určení průkaznosti vlivu teploty na obsah Oox při mimopecním zpracování tekutého kovu byl proveden test č.19.

Tab.č.52: Koeficienty t-testu vlivu teploty mimopecního zpracování na obsah Oox

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	1,255e + 01	2,495e+02	0,050	0,960
t_p	- 3,248e-04	1,749e-01	- 0,002	0,999

Tab.č.53: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
t_p	1	2,362e-04	3,449e-06	0,9985

Z výsledků testu č.19, které jsou uvedeny v tabulce č.52 a 53, vyplývá, že teplota nemá statisticky významný vliv na obsah Oox v tekutém kovu při mimopecním zpracování.

Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být vytvoření takových chemických, teplotních a tlakových podmínek, které umožnily, že nedocházelo k výrazným změnám v obsahu Oox.

8.2.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku

8.2.2.1 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při tavení

Test č.20 - Vliv chemického složení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu chemického složení (obsahu uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, síry, chromu, manganu a hliníku) na obsah dusíku při tavení v BRPP byl proveden test č.20.

U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu dusíku dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.54: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	11,877	60,365	0,197	0,8454
C	13,154	6,673	1,971	0,0533 *
Si	- 53,777	6,765	- 7,949	9,12e-09 ***
Mn	236,169	180,875	1,306	0,2019
P	632,213	1444,759	0,438	0,6649

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

S	- 1067,344	2222,619	- 0,480	0,6347
Cr	- 435,532	2164,097	- 0,201	0,8419
Mg	1195,602	1942,649	0,615	0,5431
Al	3262,237	2766,653	1,179	0,2479

Tab.č.55: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	3899,6	82,1286	5,863e-10 ***
Si	1	4010,5	84,4646	4,322e-10 ***
Mn	1	124,8	2,6276	0,1158
P	1	2,4	0,0502	0,8243
S	1	28,9	0,6084	0,4417
Cr	1	0,3	0,0068	0,9346
Mg	1	35,5	0,7468	0,3946
Al	1	66,0	1,3903	0,2479

Z výsledků testu č.20, které jsou uvedeny v tabulce č.54 a 55, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv uhlíku a křemíku na obsah dusíku v litině při tavení v bubnové rotační plynové peci. Se snižujícím se obsahem uhlíku se snižuje hodnota obsahu dusíku a se snižujícím se obsahem křemíku se hodnota dusíku v litině zvyšuje. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu jen z části a může být způsobem přímým působením hořáku na taveninu a chemickými reakcemi mezi kyslíkem, uhlíkem a dusíkem.

Ostatní sledované prvky – mangan, fosfor, síra, chrom, hořčík a hliník – nemají na obsah dusíku při tavení statisticky významný vliv. Tento výsledek testu neodpovídá teoretickému

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

předpokladu a může být způsoben skutečností, že obsah dusíku v závislosti na obsahu těchto prvků se výrazně neměnil a proto byl vyhodnocen jako statisticky významný.

Z koeficientů testovaného modelu vlivu chemického složení na obsah dusíku v tekutém kovu, je možné sestavit regresní rovnici (83).

$$N = 11,877 + 13,154 C - 53,777 Si + e \quad (83)$$

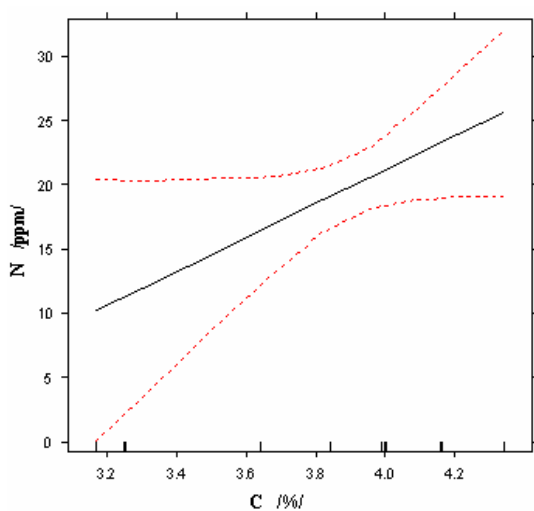
kde: **N** ... celkový obsah dusíku v tekutém kovu (ppm)

Si ... obsah křemíku (%)

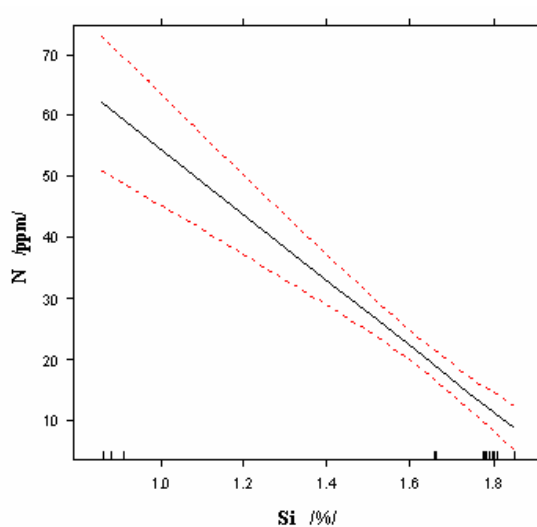
Al ... obsah hliníku (%)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv obsahu uhlíku a křemíku na obsah dusíku, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.48 a 49.



Obr.č.48: Vliv uhlíku na obsah dusíku



Obr.č.49: Vliv křemíku na obsah dusíku

Test č.21 - Vliv časové prodlevy na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu časové prodlevy při tavení na obsah dusíku byl proveden test č.21. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu plynů v tavenině dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky, druhý vzorek byl odebrán po určité časové prodlevě.

Tab.č.56: Koeficienty t-testu vlivu časové prodlevy při tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	46,356	21,961	2,111	0,0476
čas	- 10,051	8,633	- 1,164	0,2580

Tab.č.57: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
čas	1	439,4	1,3554	0,2580

Z výsledků testu č.21, které jsou uvedeny v tabulce č.56 a 57, vyplývá, že časová prodleva při tavení nemá statisticky významný vliv na obsah dusíku v tekutém kovu.

Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být rychlé natavení vsázky a minimální časové prostoje při odběru a následném zpracování tekutého kovu.

Test č.22 – Vliv teplotních podmínek tavení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu teploty tavení na obsah dusíku při tavení byl proveden test č.22. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu plynů v tavenině dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky a druhý vzorek po určité časové prodlevě.

Tab.č.58: Koeficienty t-testu vlivu teploty tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	243,8846	267,4641	0,912	0,368
t_p	1,5966	0,1624	9,829	1,33e-11 ***

Tab.č.59: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
t_p	1	3965,1	55,700	9,741e-09 ***

Z výsledků testu č.22, které jsou uvedeny v tabulce č.58 a 59, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv teploty tavení na obsah dusíku v tavenině, tzn. že v rozsahu naměřených teplot tavení (1524-1563⁰C), bylo prokázáno, že se zvyšující se teplotou tavení se zvyšuje obsah dusíku v tekuté litině.

Výsledek testu odpovídá teoretickému předpokladu, kdy se zvyšující se teplotou se zvyšuje i rozpustnost plynu v kovu, v tomto případě pak zejména v místech styku taveniny s plamenem, kdy tato část hladiny tekutého kovu není chráněna struskou. Působení vysokých teplot a rozdílná

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

koncentrace dusíku v tavenině a pecní atmosféře může způsobovat zvýšení obsahu dusíku v tekuté litině.

Z koeficientů testovaného modelu vliv teploty při mimopecním zpracování na obsah dusíku v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (84).

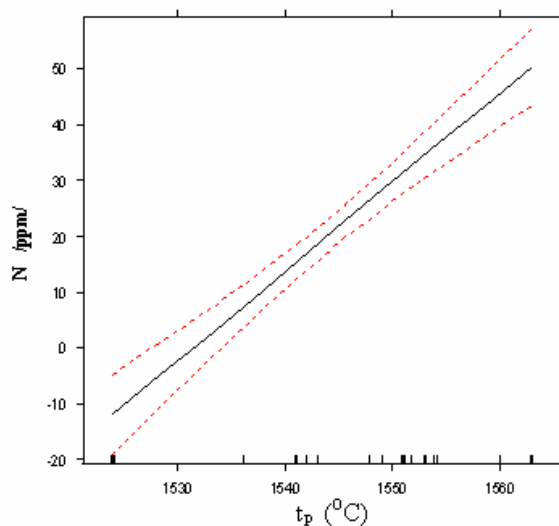
$$N = 243,8846 + 1,5966 t_p + e \quad (84)$$

kde: N ... obsah dusíku (ppm)

t_p ... teplota tekutého kovu při tavení ($^{\circ}\text{C}$)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivka s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv teploty tavení na obsah dusíku, tak jak ji na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, je na obrázku č.50.



Obr.č.50: Vliv teploty tavení na obsah dusíku

Test č.23 – Vliv tlakových podmínek při tavení na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku oxidu uhelnatého při tavení na obsah dusíku byl proveden test č.23. U některých měření byly při výrobě tekutého kovu odebrány pro stanovení obsahu plynů v tavenině dva vzorky. První vzorek byl odebrán po natavení pevné vsázky a druhý vzorek po určité časové prodlevě.

Tab.č.60: Koeficienty t-testu vlivu obou tlaků při tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 86,08	79,43	- 1,084	0,2861
$p_{(m+a)}$	106,53	64,89	1,642	0,1099
$p_{co (tp)}$	- 50,69	51,09	- 0,992	0,3281

Tab.č.61: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
$p_{(m+a)}$	1	2211,3	18,9090	0,000118 ***
$p_{co (tp)}$	1	2705,0	23,1312	3,029e-05 ***

Z výsledků testu č.23, které jsou uvedeny v tabulce č.60 a 61, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv obou tlaků na obsah dusíku v tavenině. Se zvyšující se hodnotou součtu metalostatického a atmosférického tlaku se zvyšuje obsah dusíku, naopak se zvyšující se hodnotou parciálního tlaku oxidu uhelnatého se obsah dusíku při tavení snižuje.

Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu, kdy se v případě výsledku vlivu součtu metalostatického a atmosférického tlaku potvrdila platnost Sievertsova zákona - se zvyšující se hodnotou tlaku se zvyšuje také množství rozpuštěného plynu v kovu. Tzn. čím větší bude hodnota

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

tohoto součtu, tím lepší podmínky budou vytvořeny pro pohlcování dusíku taveninou až do doby vyrovnání vzájemných koncentrací. V případě vlivu parciálního tlaku oxidu uhelnatého (v tavenině se zvyšuje obsah kyslíku) na obsah dusíku může docházet k vzájemným chemickým reakcím mezi dusíkem, kyslíkem a ostatními prvky a tím také ke snížení obsahu dusíku v tekuté litině.

Z koeficientů testovaného modelu vliv tlaku na obsah dusíku v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (85).

$$N = -86,08 + 106,53 p_{(a+m)} - 50,69 p_{co(tp)} + e \quad (85)$$

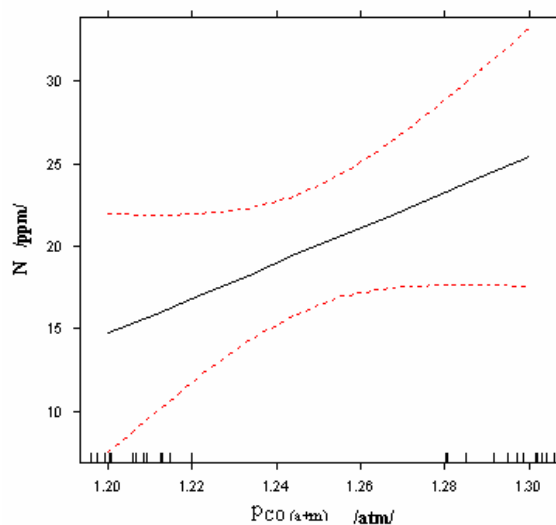
kde: N ... obsah dusíku (ppm)

$p_{(a+m)}$ hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku (atm)

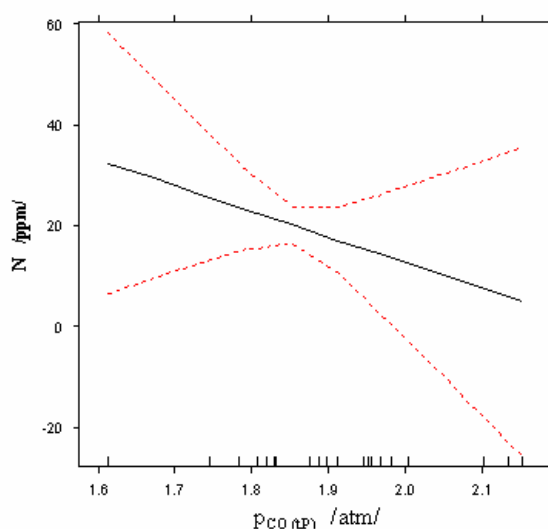
$p_{co(tp)}$... hodnota parciálního tlaku CO při teplotě tavení (atm)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv součtu metalostatického a atmosférického tlaku a parciálního tlaku při teplotě tavení na obsah dusíku, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.51 a 52.



Obr.č.51 : Vliv metalostatického



Obr.č.52: Vliv parciálního tlaku CO

8.2.2.2 Vliv sledovaných parametrů na obsah dusíku při mimopecním**zpracování****Test č.24 – Vliv chemického složení na obsah dusíku**

Pro určení průkaznosti vlivu chemického složení na obsah dusíku při procesu očkovaní nebo procesu modifikace s následným očkováním tekutého kovu, byl proveden test č.24 .

Tab.č.62: Koeficienty t-testu vlivu chemického složení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	- 22,011	176,584	- 0,125	0,9027
C	- 4,133	9,460	- 0,437	0,6694
Si	- 17,030	23,604	- 0,721	0,4834
Mn	- 243,828	495,727	- 0,492	0,6310
P	2320,802	2889,613	0,803	0,4363
S	- 514,624	3286,595	- 0,157	0,8780
Cr	1687,207	5668,674	0,298	0,7707
Mg	- 1023,286	560,127	- 1,827	0,0908
Al	1135,886	2460,468	0,462	0,6520

Tab.č.63: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
C	1	4,46	0,0842	0,77624
Si	1	2323,13	48,8312	1,662e-05 ***
Mn	1	130,69	2,4658	0,14036
P	1	27,69	0,5225	0,48259
S	1	8,77	0,1655	0,69077
Cr	1	12,33	0,2326	0,63762
Mg	1	167,37	3,1579	0,04895 *
Al	1	11,30	0,2131	0,65196

Z výsledků testu č.24, které jsou uvedeny v tabulce č.62 a 63, vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv křemíku a hořčíku na obsahu dusíku při mimopecním zpracování, kdy se zvyšující se hodnotou obsahu křemíku a hořčíku se snižuje obsah dusíku v tekuté litině. Jako statisticky nejvýraznější vliv na obsah dusíku má křemík.

Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou mohou být právě výrazné obsahové změny křemíku a hořčíku a chemické reakce probíhající mezi sledovanými prvky v tekutém kovu.

Obsah křemíku se výrazně mění při procesu očkování, který sice není provázen výraznými teplotními a tlakovými změnami jako proces modifikace, přesto byl rozdíl mezi obsahem křemíku před a po provedené modifikaci a jeho vliv na obsah dusíku v tekutém kovu natolik výrazný, že byl určen jako statisticky velmi významný.

Při modifikaci dochází k výrazným teplotním a tlakovým změnám. A právě těmito teplotním a tlakovými změnami, respektive vývinu hořčkových par, připisují vliv na hodnotu obsahu dusíku v tekutém kovu, neboť jejich vznikem by mohlo docházet ke snížení obsahu dusíku v tavenině vzájemnými chemickými reakcemi mezi kyslíkem, hořčíkem a dusíkem.

Ostatní sledované prvky– uhlík, mangan, fosfor, síra, chrom, hořčík a hliník – nemají statisticky významný vliv na obsah dusíku při mimopecním zpracování. Příčinou tohoto výsledku může být skutečnost, že rozdíl mezi obsahem těchto prvků před a po provedeném mimopecním zpracování a jeho vliv na obsah dusíku nebyl výrazný a proto byl určen jako statisticky nevýznamný.

Z koeficientů testovaného modelu vliv chemického složení při mimopecním zpracování na obsah dusíku v tavenině, je možné sestavit regresní rovnici (86).

$$N = - 22,011 - 17,030 Si - 1023,286 Mg + e \quad (86)$$

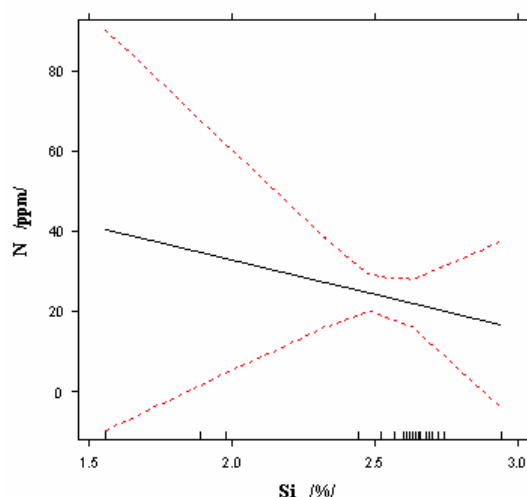
kde: **N** ... obsah dusíku (ppm)

Si ... obsah křemíku (%)

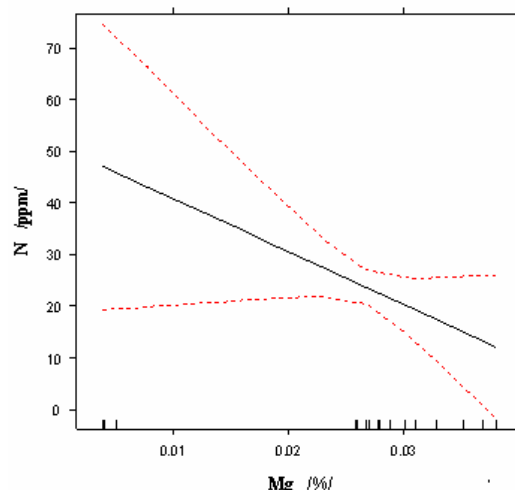
Mg ... obsah hořčíku (%)

e ... modelem nevysvětlitelná variabilita

Regresní křivky s 95% konfidenčními intervaly znázorňující vliv obsahu křemíku a hořčíku na obsah dusíku, tak jak je na základě naměřených hodnot předpovídá regresní model, jsou na obrázcích č.53 a 54.



Obr.č.53: Vliv obsahu křemíku na obsah dusíku při mimopecním pracování



Obr.č.54: Vliv obsahu hořčíku na obsah dusíku při mimopecním zpracování

Test č.25 – Vliv teplotních podmínek na obsah dusíku

Pro určení průkaznosti vlivu teploty na obsah dusíku při mimopecním zpracování tekutého kovu byl proveden test č.25.

Z výsledků testu č.25, které jsou uvedeny v tabulce č.64 a 65, vyplývá, že teplota nemá statisticky významný vliv na obsah dusíku v tekutém kovu při mimopecním zpracování.

Tab.č.64:Koeficienty t- testu vlivu teploty mimopecního zpracování na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	1,255e+01	2,495e+02	0,050	0,960
t_p	- 3,248e-04	1,749e-01	- 0,002	0,999

Tab.č.65: ANOVA testovaného modelu

	Počet stupňů volnosti	Suma čtverců	Hodnota F	Hodnota p
tp	1	2,362e-04	3,449e-06	0,9985

Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu a může být způsoben skutečností, že při naměřených teplotách již není výrazně podporována schopnost dusíku výrazně měnit svoji koncentraci.

8.2.3 Výsledky statistického zpracování pro technologii bubnových

rotačních plynových pecí

Pro zjištění vlivu sledovaných parametrů na obsah Oox a dusíku, u slévárny využívající pro tavení BRPP, bylo provedeno také celkem 12 testů. Výsledky těchto testů prokázaly, že na:

- obsah **Oox** má signifikantní vliv:

- při tavení – mangan, hořčík, parciální tlak oxidu uhelnatého a hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku
- při mimopecním zpracování – křemík.

- na obsah **dusíku** má signifikantní vliv:

- při tavení – uhlík, křemík, teplota tavení, parciální tlak oxidu uhelnatého a hodnota součtu metalostatického a atmosférického tlaku
- při mimopecním zpracování – křemík a hořčík.

Ostatních sledované faktory, ať již při tavení nebo mimopecním zpracování nemají statisticky významný vliv na obsah Oox a dusíku. Výsledky provedených testů č.14-25, pro technologii BRPP, jsou uvedeny tabulce č.66.

Tab.č.66: Výsledků statistického zpracování pro technologii BRPP

			B R P P			
			tavení		mimopecní zpracování	
			Oox	N	Oox	N
Sledovaný parametr	Chemické složení	C	0	***	0	0
		Si	0	***	*	***
		Mn	*	0	0	0
		P	0	0	0	0
		S	0	0	0	0
		Cr	0	0	0	0
		Mg	*	0	0	*
		Al	0	0	0	0
	Čas	t	0	0	/	/
	Teplota	t _p	0	***	0	0
		t _R	0	/	/	/
		t _{PUV}	0	/	/	/
	Tlak	p _(m+a)	*	***	/	/
		p _{CO} (t _p)	*	***	/	/

vysvětlivky: * - vliv sledovaného parametru statisticky významný,

** - vliv sledovaného parametru statisticky více významný,

***-vliv sledovaného parametru statisticky velmi významný,

8.3 Vliv druhu litiny na obsah plynů

8.3.1 Technologie elektrických indukčních středofrekvenčních

kelímkových pecí

Pro určení průkaznosti vlivu druhu vyráběné litiny na obsah Oox a dusíku technologie IPSF byl proveden test č.26.

u

Tab.č.67: Koeficienty t-testu, průměrné obsahy Oox a N

		hodnota	hodnota	GJL	GJS
	Řada	t	p	průměr /ppm/	průměr /ppm/
Oox	I, II	- 4,7494	5,884e-06 *	19,16	33,37
Oox	IV, V	-0,4284	0,6706	28,85	31,47
N	I, II	0,8801	0,3806	83,93	79,20
N	IV, V	3,0097	0,0041*	84,92	67,03

Z výsledků testu č.26, které jsou uvedeny v tabulce č.67 vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv vyráběného druhu materiálu při technologii IPSF na:

- obsah Oox při tavení

- obsah dusíku při mimopecním zpracování.

Při porovnání průměrných naměřených hodnot obsahu Oox vidíme, že:

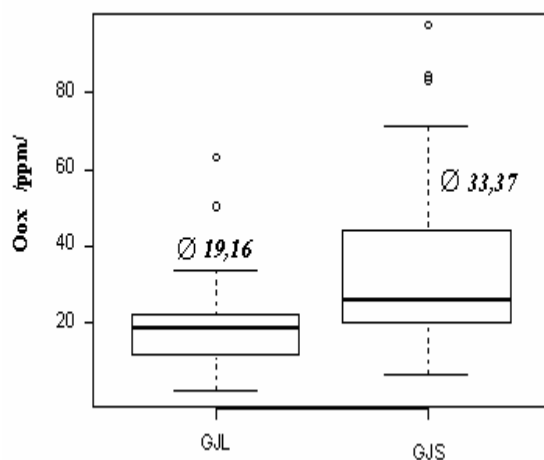
- u litin s lupínkovým grafitem byl při tavení naměřen nižší obsah Oox než u litin s kuličkovým grafitem. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou je rozdílné chemické složení – zejména obsah uhlíku a křemíku.

- obsah Oox u obou druhů litin po provedeném mimopecním zpracování se výrazně neliší. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a může být způsoben skutečností, že jsem neměřila obsah kyslíku, ale obsah celkového kyslíku ve formě oxidů, u něhož se rozdíl nemusel projevit výrazným snížením nebo zvýšením své hodnoty.

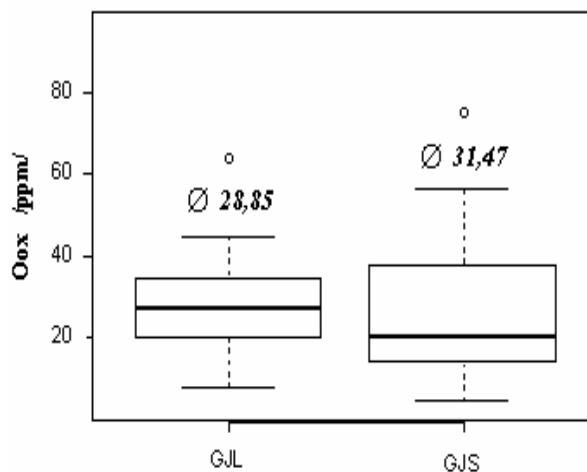
Při porovnání průměrných naměřených hodnot obsahu dusíku můžeme konstatovat, že:

- u litin s lupínkovým grafitem byl naměřen vyšší obsah dusíku a to jak při tavení, tak i při mimopecním zpracování, než u litin s kuličkovým grafitem. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinu můžeme vidět v nastavení příznivých chemických, teplotních a tlakových podmínek pro snížení obsahu dusíku v tekutém kovu.

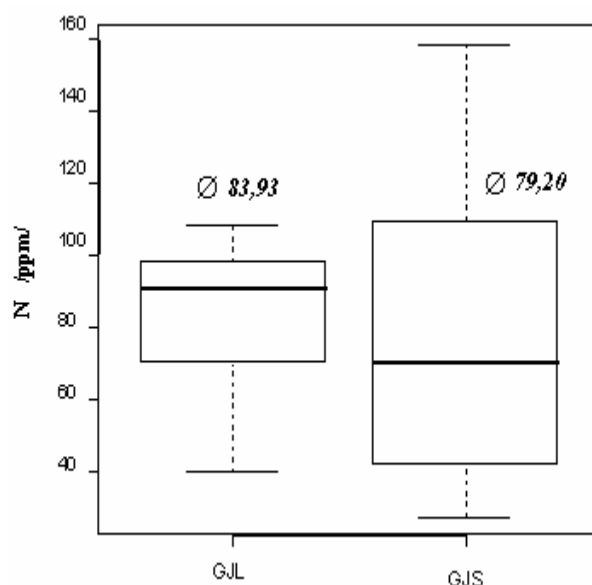
Grafické znázornění výsledků testu je na obrázcích č.55-58. Silnou čarou je v jednotlivých obdélnících zvýrazněn medián, proloženě je v obrázku zapsána průměrná hodnota obsahu sledovaného prvku (Oox, N).



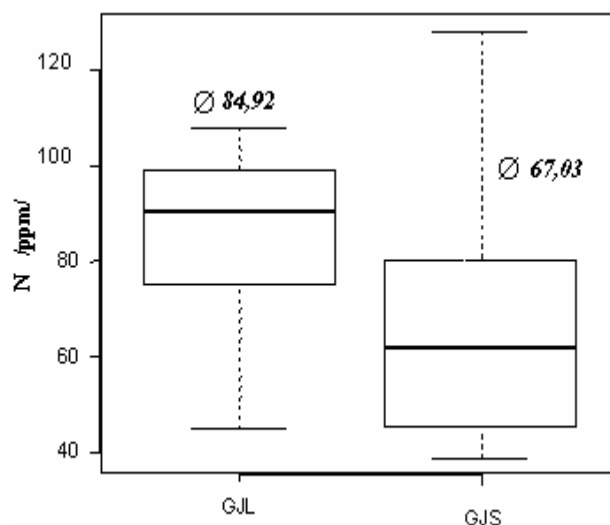
Obr.č. 55: Obsah Oox pro řady I, II



Obr.č 56: Obsah Oox pro řady IV, V



Obr.č.57: Obsah dusíku pro řady I, II



Obr.č.58: Obsah dusíku pro řady IV, V

8.3.2 Technologie bubnových rotačních plynových pecí

Pro určení průkaznosti vlivu druhu vyráběné litiny na obsah Oox a dusíku u technologie BRPP byl proveden test č.27.

Tab.č.68: Koeficienty t-testu, průměrné obsahy Oox a N

	Řada	hodnota t	hodnota p	GJL průměr /ppm/	GJS průměr /ppm/
Oox	I, II	- 1,0027	0,3552	21,6	24,6
Oox	IV, V	4,1111	0,0019 *	20,33	10,79
N	I, II	8,918	0,00044 *	56,00	14,27

N	IV, V	6,9529	0,01246	51,33	19,32
---	-------	--------	---------	-------	-------

Z výsledků testu č.27, které jsou uvedeny v tabulce č.68 vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv vyráběného druhu materiálu u technologie BRPP na:

- obsah Oox při mimopecním zpracování
- obsah dusíku při tavení.

Při porovnání průměrných naměřených hodnot obsahu Oox vidíme, že:

- u litin s lupínkovým grafitem byl při tavení přibližně stejný obsah Oox jako u litin s kuličkovým grafitem. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být nevýrazný rozdíl v chemickém složení taveniny.

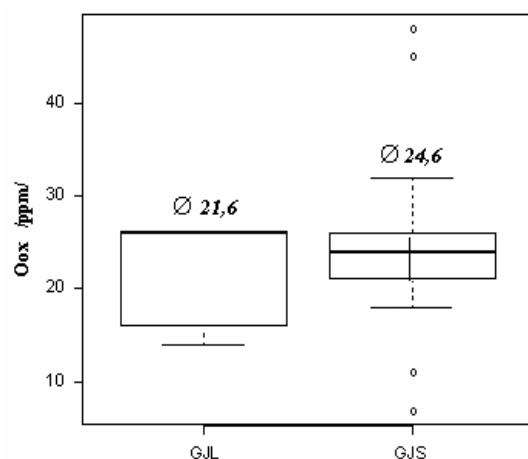
- obsah Oox po mimopecním zpracování je u litin s lupínkovým grafitem vyšší než u litin s kuličkovým grafitem. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a může být způsoben změnou v chemickém složení vyráběného druhu litiny.

Při porovnání průměrných naměřených hodnot obsahu dusíku můžeme konstatovat, že:

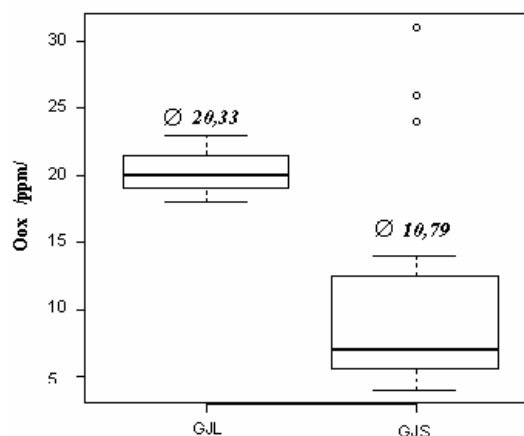
- obsah dusíku při tavení je u litin s lupínkovým grafitem vyšší než u litin s kuličkovým grafitem. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být technologie výroby tekutého kovu – přímý styk plamene hořáku s taveninou, rotace bubnu,

- obsah dusíku po mimopecním zpracování je u litin s lupínkovým grafitem vyšší než u litin s kuličkovým grafitem. Tento výsledek odpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinu můžeme vidět v nastavení příznivých chemických, teplotních a tlakových podmínek pro snížení obsahu dusíku v tekutém kovu při mimopecním zpracování.

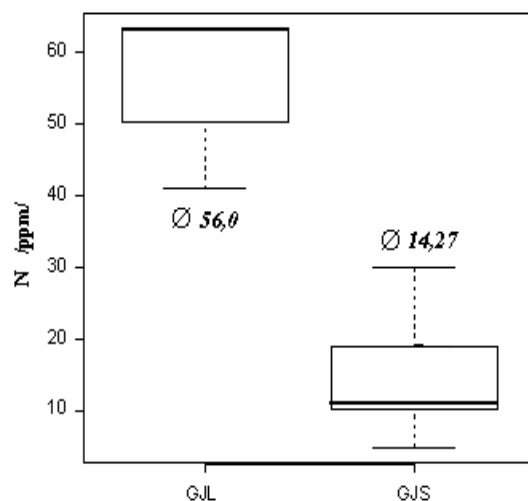
Grafické znázornění výsledků testu je na obrázcích č. 59-62. Silnou čarou je v jednotlivých obdélnících zvýrazněn medián, proloženě je v obrázku zapsána průměrná hodnota obsahu sledovaného prvku (Oox, N).



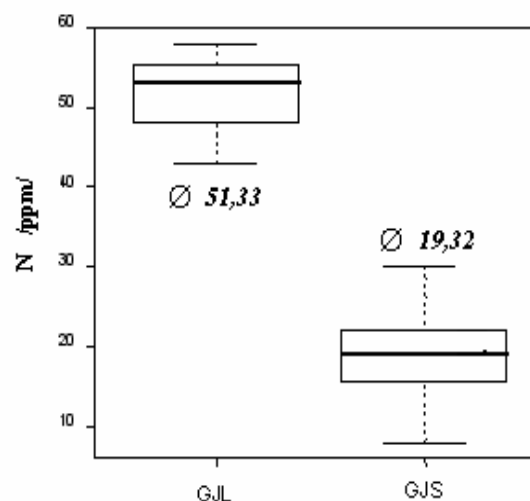
Obr.č.59: Obsah Oox pro řady I, II



Obr.č.60: Obsah Oox pro řady IV, V



Obr.č.61: Obsah dusíku pro řady I, II



Obr.č.62: Obsah dusíku pro řady IV, V

8.4 Porovnání elektrických indukčních středofrekvenčních kelímkových pecí a bubnových rotačních plynových pecí

8.4.1 Obsah Oox a dusíku při tavení

Pro určení průkaznosti vlivu technologie tavení – tavícího zařízení - na obsah Oox a dusíku v tekutém kovu byl proveden test č.28.

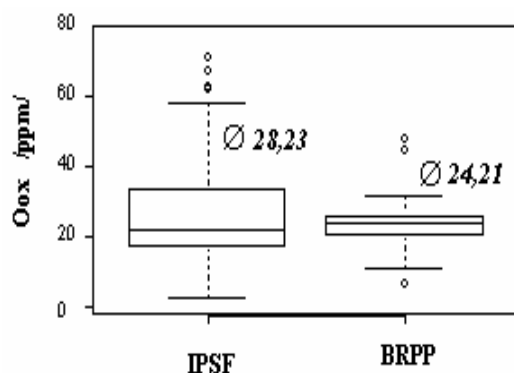
Tab.č.69: Koeficienty t-testu, průměrné obsahy Oox a N při tavení

		hodnota	hodnota	IPSF	BRPP
	Řada	t	p	průměr /ppm/	průměr /ppm/
Oox	I, II	1,8768	0,06246	28,23	24,21
N	I, II	15,1396	2,2e-16 *	80,91	19,76

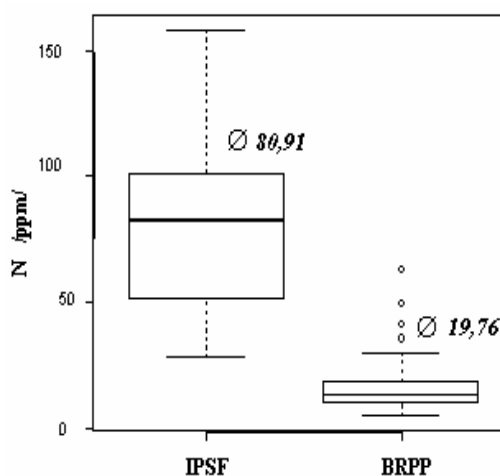
Z výsledků testu č.28, které jsou uvedeny v tabulce č.69 vyplývá, že byl prokázán pouze signifikantní vliv technologie tavení na obsah dusíku, kdy při tavení v BRPP byly naměřeny výrazně nižší hodnoty obsahu dusíku než při tavení v IPSF.

Při porovnání průměrných naměřených hodnot obsahu Oox vidíme, že obsah Oox není u obou sledovaných tavících agregátů výrazně odlišný. Výrazně odlišný je však průměrný obsah dusíku, který je u BRPP podstatně nižší než u IPSF. Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu, kdy jsou v odborné literatuře uváděny, zejména u obsahu dusíku, vyšší hodnoty u technologie BRPP než u technologie IPSF. Příčinou tohoto výsledku může být, zejména u obsahu dusíku, použití kvalitnějších vsázkových surovin, přímý stykem plamene s taveninou, rotace bubnu, vhodné chemické, teplotní a tlakové podmínky.

Grafické znázornění výsledků testu je na obrázcích č.63 a 64. Silnou čarou je v jednotlivých obdélnících zvýrazněn medián, proloženě je v obrázku zapsána průměrná hodnota obsahu sledovaného prvku (Oox, N).



Obr.č.63: Obsah Oox



Obr.č.64: Obsah dusíku N

8.4.2 Obsah Oox a dusíku při mimopecním zpracování

Pro určení průkaznosti vlivu druhu mimopecního zpracování, tj. procesu očkování a procesu modifikace s následným očkováním, na obsah Oox a dusíku v tekutém kovu vyrobeném technologií IPSF a BRPP byl proveden test č.29.

Tab.č.70: Koeficienty t-testu, průměrná hodnota Oox a N

				IPSF	BRPP
	Řada	hodnota	hodnota	průměr /ppm/	průměr /ppm/
		t	p		

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

Oox	IV	3,668	0,64107	34,57	20,33
Oox	V	3,367	0,001878 *	31,47	12,10
N	IV	6,597	0,00642 *	86,52	51,00
N	V	7,868	7,505e-10 *	67,03	21,68

Z výsledků testu č.29, které jsou uvedeny v tabulce č.70 vyplývá, že byl prokázán signifikantní vliv mimopecního zpracování na:

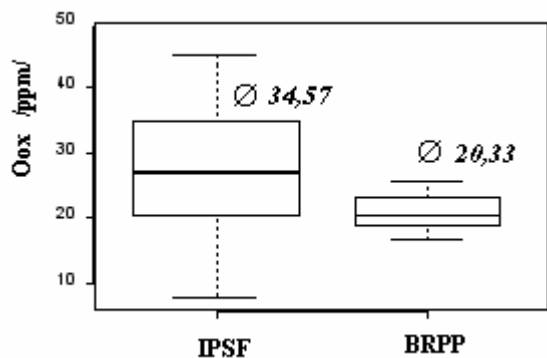
- obsah Oox po provedené modifikaci s následným očkováním
- obsah dusíku po očkování
- a obsah dusíku po provedené modifikaci s následným očkováním.

Při porovnání průměrných naměřených hodnot obsahu Oox vidíme, že:

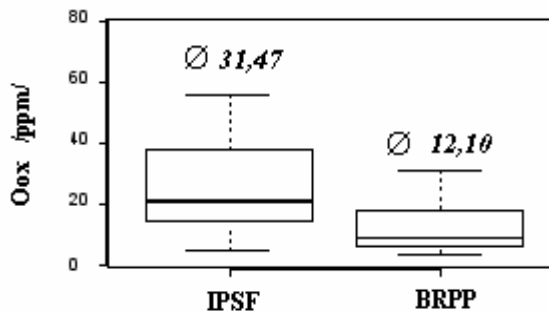
- průměrná hodnota obsahu Oox a dusíku při procesu očkování (IV) je u tekutého kovu z IPSF vyšší než z BRPP
- průměrná hodnota obsahu Oox a dusíku při procesu modifikace s následným očkováním (V) je u tekutého kovu z IPSF také vyšší než z BRPP.

Tento výsledek neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být – u technologie BRPP – použití kvalitnějších vstupních surovin, dohřev taveniny před dalším odběrem na teplotu cca 1550°C, rychlý odběr a následné zpracování tekutého kovu, minimální prostoje ve výrobě.

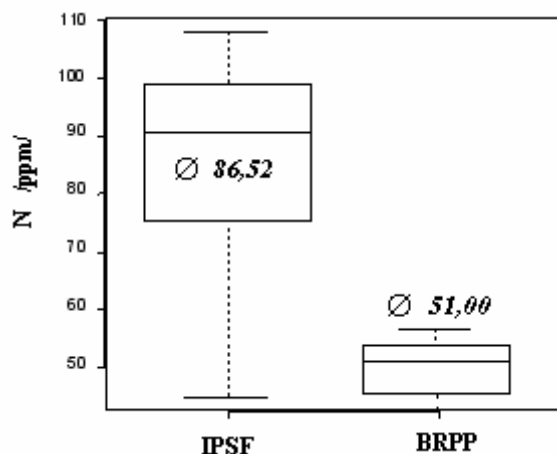
Grafické znázornění výsledků testu je na obrázcích č.65-68. Silnou čarou je v jednotlivých obdélnících zvýrazněn medián, proloženě je v obrázku zapsána průměrná hodnota obsahu sledovaného prvku (Oox, N).



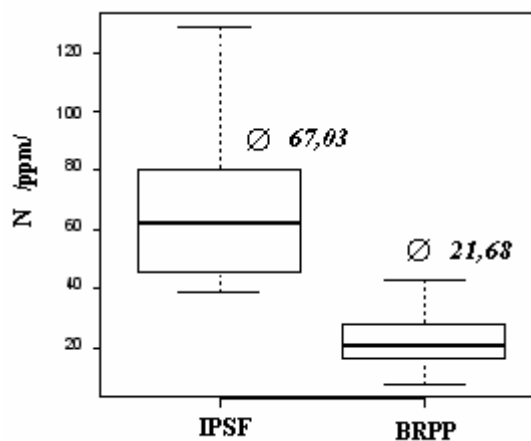
Obr.č.65: Obsah Oox po očkování



Obr.č.66: Obsah Oox po modifikaci



Obr.č.67: Obsah dusíku po očkování



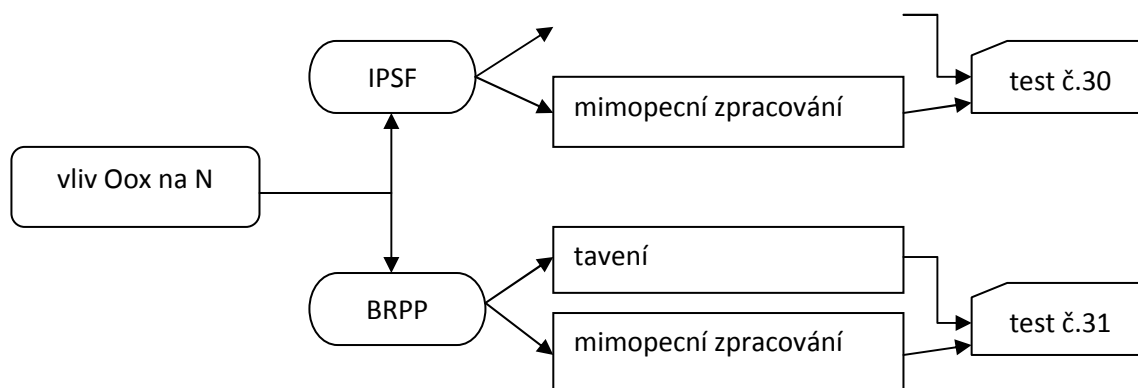
Obr.č.68: Obsah dusíku po modifikaci

8.5 Vliv obsahu Oox na obsah dusíku

Pro určení vzájemného vztahu mezi obsahem celkového kyslíku ve formě oxidů a obsahem dusíku byly provedeny celkem 2 testy – test č.30 a 31. Jejich rozdělení je uvedeno v následujícím obrázku č.69.

Obr.č.69: Schematické znázornění provedených testů pro určení vlivu obsahu Oox
na obsah dusíku

tavení

**Test č.30 - Vliv obsahu Oox na obsah dusíku u technologie IPSF**

Pro určení průkaznosti vlivu obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů na obsah dusíku u technologie IPSF byl proveden test č.30.

Tab.č.70: Koeficienty t-testu vlivu časové prodlevy při tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	81,0095	5,4416	14,88	<2e-16
tavení (I,II)	-0,0031	0,1584	-0,023	0,982
mimopecní zpracování (IV, V)	0,2503	0,1630	1,535	0,131

Z výsledků testu č.30, které jsou uvedeny v tabulce č.71, vyplývá, že obsah celkového kyslíku ve formě oxidů nemá statisticky významný vliv na

obsah dusíku při tavení a mimopecním zpracování u sléváren využívající technologii IPSF.

Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být skutečnost, že hodnoty obsahu dusíku v závislosti na obsahu Oox se výrazně neliší a proto byly určeny jako statisticky nevýznamné.

Test č.31 - Vliv obsahu Oox na obsah dusíku u technologie BRPP

Pro určení průkaznosti vlivu obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů na obsah dusíku u technologie BRPP byl proveden test č.31.

Tab.č.72: Koeficienty t-testu vlivu časové prodlevy při tavení na obsah dusíku

	Odhad regresního koeficientu	Chyba odhadu regresního koeficientu	Hodnota t	Hodnota p
průsečík	28,0323	9,2972	3,015	0,0047
tavení (I,II)	-0,3416	0,3686	-0,927	0,3602
mimopecní zpracování (IV, V)	0,4443	0,3366	1,320	0,2017

Z výsledků testu č.31, které jsou uvedeny v tabulce č.72, vyplývá, že obsah celkového kyslíku ve formě oxidů nemá statisticky významný vliv na obsah dusíku při tavení a mimopecním zpracování u sléváren využívající technologii BRPP.

Výsledek testu neodpovídá teoretickému předpokladu a jeho příčinou může být skutečnost, že hodnoty obsahu dusíku v závislosti na obsahu Oox se výrazně neliší a proto byly určeny jako statisticky nevýznamné.

9. Závěr

V předložené disertační práci, zaměřené na obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu, je v úvodu stručně popsána problematika negativního vlivu plynů ve slévárenské výrobě, s popisem rozdílů mezi výrobou oceli a litiny z hlediska teorie roztavených kovů.

Teoretická část práce je zaměřena na pochopení vzájemného působení plynů s tuhým a tekutým kovem, charakteristiku jednotlivých plynů a jejich úlohu v metalurgii železa, včetně stručného popisu skupiny vad označených jako dutiny. Součástí teoretického základu je také vysvětlení odlišností principu tavení v elektrické indukční středofrekvenční kelímkové peci a plynové rotační bubnové peci, popis základních chemických, termodynamických a fyzikálních podmínek tavení a objasnění procesu dezoxidace litin.

Na teoretickou část práce navazuje experimentální část, která popisuje zvolenou metodiku měření a vyhodnocení získaných dat.

Disertační práci je možné zařadit do širokého spektra výzkumných prací v oboru slévárenství, kdy byly teoretické poznatky aplikovány přímo do podmínek reálné praxe. Součástí řešení dané problematiky bylo také sledování nových teoretických poznatků z odborné literatury a jejich porovnání s dosaženými výsledky. I přes skutečnost, že se ne

vždy dosažené výsledky shodovaly s teoretickými předpoklady, se podařilo naplnit cíle disertační práce takto:

♦ na základě provedených analýz je možné rozdělit jednotlivé tavby do tří skupin :

První skupina taveb bude probíhat po všech sledovaných parametrech optimálně a nebude potřebný žádný zásah (teplotní, časový nebo desoxidační), pro snížení obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů, jako preventivní opatření pro zamezení výskytu endogenních bublin.

Do druhé skupiny taveb budou zařazeny ty tavby, u nichž bude nutné pro snížení obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů provést teplotní, časový nebo dezoxidační zásah, jako preventivní opatření pro zamezení výskytu endogenních bublin.

Třetí skupina taveb bude obsahovat tavby s velmi nízkým nebo velmi vysokým obsahem celkového kyslíku ve formě oxidů. Zde bude nutné provést nové měření a na základě jeho výsledku tavbu zařadit do první nebo druhé skupiny.

♦ naměřené obsahy celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku:

- u sléváren používající pro tavení elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece jsou obsahy celkového kyslíku ve formě oxidů srovnatelné s hodnotami uváděnými v odborné literatuře, naměřené hodnoty obsahy dusíku jsou nižší než uvádí odborná literatura
- u slévárny používající pro tavení bubnové rotační plynové pece byly naměřeny nižší obsahy celkového obsahu kyslíku ve formě oxidů a dusíku, než uvádí odborná literatura

U sléváren používající pro tavení elektrické indukční středofrekvenční kelímkové pece byl, dle statistického vyhodnocení všech sledovaných parametrů, prokázán signifikantní vliv :

- na obsah **Oox**:
 - při tavení – uhlíku, chromu, hořčíku, hliníku, časové prodlevy, teploty tavení a parciálního tlaku oxidu uhelnatého
 - při mimopecním zpracování – křemíku, hořčíku a teploty.
- na obsah **dusíku**:
 - při tavení – uhlíku, křemíku, manganu, fosforu, chromu, hliníku, teploty tavení, parciálního tlaku oxidu uhelnatého

a hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku

- při mimopecním zpracování – křemíku, manganu, fosforu, síry, hořčíku a hliníku.

U sléváren používající pro tavení bubnové rotační plynové pece byl, dle statistického vyhodnocení všech sledovaných parametrů, prokázán signifikantní vliv:

- na obsah **Oox**:

- při tavení – manganu, hořčíku, parciálního tlaku oxidu uhelnatého a hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku
- při mimopecním zpracování – křemíku.

- na obsah **dušíku**:

- při tavení – uhlíku, křemíku, teploty tavení, parciálního tlaku oxidu uhelnatého a hodnoty součtu metalostatického a atmosférického tlaku
- při mimopecním zpracování – křemíku a hořčíku.

♦ provedená měření a statistické vyhodnocení získaných dat prokázalo, že je možné měřením obsahu Oox sledovat kvalitu tekutého kovu a provádět účinná opatření pro zabránění vzniku některých slévárenských vad – zejména pak endogenních bublin.

Na základě výsledků disertační práce navrhuji v praxi provádět:

- 1) Kontrolu stavu vsázkového materiálu – znečištění, vlhkost, kusovost aj.
- 2) Při tavení a následném mimopecním zpracování litiny zajistit, pokud možno, co nejmenší styk taveniny s atmosférou.
- 3) Stanovení obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů využít jako doplňkovou metodu v řízení jakosti tekutého kovu.
- 4) Využít vytvořený výpočetní systém pro :

Obsah plynů v litině a jejich vliv na kvalitu tekutého kovu

- a. určení teploty počátku uhlíkového varu a optimální časové výdrže při tavení na základě teploty tavení a chemické analýzy (C, Si, Oox)
- b. stanovení vhodného množství hliníku jako dezoxidačního prostředku při procesu mimopecního zpracování.

Přínos disertační práce pro vědní obor:

- 1) Byl zpracován a v reálné praxi ověřen ucelený metodický postup vedení tavby a mimopecního zpracování, který by mohl zamezit vzniku endogenních bublin u litinových odlitků.
- 2) Práce představuje ucelený pohled na obsah celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku v celém procesu výroby tekutého kovu.
- 3) Dosažené výsledky by mohly být využity jako podklad pro další výzkum obsahu a vlivu kyslíku a dusíku v litinách.
- 4) Poznatky z disertační práce by také mohly být využity v pedagogické činnosti, při výuce posluchačů daného oboru.

I když výsledky práce nepotvrdily všechny teoretické předpoklady, považuji monitoring obsahu celkového kyslíku ve formě oxidů a dusíku za metalurgicky významný nejen pro teorii, kdy rozšiřuje vědecké poznání v oboru slévárenství v rámci zkoumané problematiky, ale také pro praxi, kdy na jeho podkladě je možné sledovat určité anomálie v procesu výroby tekutého kovu a následně přijmout vhodná opatření ke zlepšení jakost vyráběných odlitků.

Seznam použité literatury

- [1] **ELBEL,T;HAVLÍČEK,F.;JELÍNEK,P.;LEVÍČEK,P.;ROUS,J.;STRÁNSKÝ,K:**
Vady odlitků ze slitin železa, str.151-191, MATECS, Brno, 1992
- [2] **ORTHS,K.;WEIS,W.;LAMPIC,M.: Einflüsse von Formstoff und Form,**
Schmelzföhrung und Desoxidation auf die Entstehung verdeckter Fehler bei
Gußeisen, Giesserei-forschung 27, str.113-128, Düsseldorf 1975
- [3] **PRUMBAUM,R.;ORTHS,K.: Verfahren und Einrichtung zur Schnell-**
bestimmung von Gasen, insbesondere des Sauerstoffes, und der vorliegenden
Bindungsformen in Metellen, Giesserei-forschung 31, str.71-82, Düsseldorf 1979
- [4] **ŘEZNÍČEK,M.:Úvahy o reakcích plyných prvků v litině, Slévárenství č.3-4,**
str.172-174, Brno, 1970
- [5] **ELBEL.T.;ŠENBERGER,J.;ZADERA,A.;HAMPL,J.: Behaviour of oxygen in**
cast irons. Archives of Materials Science and Engineering,vol. 33,2008,
issue 2 ,s.111-116
- [6] **ZEDNÍK,V.: Kapitoly z fyziky kovů, str.230-252, Vědecko-technické**
nakladatelství,Praha, 1950
- [7] **KALOUSEK,J.;DOBROVSKÝ,L.: Teorie hutních pochodů, str. 114-130,**
Editační středisko VŠB, VŠB-TU Ostrava, 1998
- [8] **HAVLÍČEK,F.;SLOVÁK,S.: Slévárenství, str.36-50, Editáční středisko VŠB,**
VŠB-TU Ostrava, 1959
- [9] **GREENWOOD,N.N.;EARNSHAW,A.: Chemie prvků, I.svazek, str. 59-94, 492-**
571, 734-572, Informatorium, Praha, 1993
- [10] **Diderot s.r.o., Encyklopedie DIDEROT, Praha 1994**
- [11] **MYSLIVEC,T.: Fyzikálně chemické základy ocelářství, str. 247- 257, SNTL,**
Praha, 1971
- [12] **COLLAUD,A.;THIEME, J.C.: Giesserei č.8, Düsseldorf 1966**
- KEPKA,M.: Rafinace oceli, SNTL, Praha 1989**

[13]

[14] **BŮŽEK,Z. : Hutník, 31, 1981, č.3**

[15] **BŮŽEK,Z.: Základní termodynamické výpočty, Hutní aktuality, 1988, VÚHŽ**

[16] **HUTLA,A.;LEVÍČEK,P.;STRÁNSKÝ,K.:Výpočet aktivity kyslíku v lázni elektrické obloukové pece, Slévárenství č.3, str.161-165, Brno, 1994**

[17] **MORROGH,H.: Foundry Trade Journal, XII, 22, str. 723-735, 1955**

[18] **SÝKORA,P. : Slévárenství č.2/3, str. 61, Brno, 1976**

[19] **SÝKORA,P. : Slévárenství č.3/4, str. 115, Brno, 1971**

[20] **MÜLLER,J. : Einfluß der Schmelz- und Temperaturführung auf die Vermeidung von Schlacke- und Blasenfehlern bei Gußeisenwerkstoffen, DFB – Information 121, str.135-137, Düsseldorf, 2001**

[21] **HOFMANN,E.;KOLORZ,A.;ORTHS,K.: Einfluß unterschiedlicher Desoxidations- und Impfverfahren auf Reinheitsgrad, Gasgehalt und Keimzustand bei technischen Eisen-Kohlenstoff-Schmelzen, Giesserei-forschung 32, str.79-95, Düsseldorf, 1980**

[22] **ORTHS,K.;WEIS,W.: Die Beeinflussung des Kieselsäuregehaltes von Guß-eisen durch die Schmelztechnik, Giesserei-forschung 25, str.9-19, Düsseldorf 1973**

[23] **ZÁDĚRA,A.;ŠENBERGER,J.;ELBEL,T.: Reoxidační pochody při odlévání slitin železa, str. 25-47, Česká slévárenská společnost, Brno, 2009**

[24] **ŠENBERGER,J.; ROUČKA, J.; ZEMČÍK, L.: Zvláštnosti výroby tvárné litiny v elektrických pecích se zřetelem na chování kyslíku po modifikaci, očkování a během tuhnutí, Sborník přednášek, Symposium Metal 2000, Ostrava, 2000**

[25] **ŠENBERGER,J.; ZÁDĚRA,A.; ELBEL,T.: Aktivita kyslíku v litinách během tavení a odlévání, Slévárenství č.7-8, str.308-312, Brno, 2005**

[26] **ŠENBERGER,J.; ZÁDĚRA,A.: Aktivita kyslíku v litinách během chladnutí ve formě, Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, č.1, řada hutnická, str.225-**

230, Ostrava, 2006

- [27] **HAMPL,J.; ELBEL, T.; KOCIAN,L.: Vznik bodlin u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, č.1, řada hutnická, str.57-64, Ostrava, 2006**
- [28] **ELBEL.T.;HAMPL,J.;VLADIK,R.;KOUKAL,R.:Vznik bodlin u litinových odlitků, Technological Engineering, vol.IV, No.1, str.2-3, 2007**
- [29] **ELBEL,T.; HAMPL,J.;VLADIK,R.;KOUKAL,R.: Vznik bodlin u litiny s vermikulárním grafitem, Acta Metallurgica Slovaca 2007, roč. 13, číslo 4/2007, s. 62 -67.**

- [30] **ELBEL,T.;HAMPL,J.; VLADIK,R.;KOUKAL,R.: Vliv chemického složení litiny s červíkovitým grafitem na výskyt bodlin v odlitcích, Technological Engineering, vol5, 2008, N.2, s. 23-27**
- [31] **MARINČEK,B.: Giesserei č.7, str. 269-273, Düsseldorf, 1984**
- [32] **MARINČEK,B.: Giesserei – Praxis, str.15-16, Düsseldorf, 1990**
- [33] **IVANOV,S.;MATLAS,F.;PACAL,L;LUBOJACKÝ,M.: Příklady metalurgických vad a vad způsobených formovacími látkami, jejich rozdělení a detekce za pomoci REM a mikrosondy, Slévárenství č.4-5, str. 141-145, Brno, 2004**
- [34] **KUROKAWA,Y.; KAMBAYASHI,H.; OZOE,N.;OTA,H.; MIKAYE,H.: Observation of Pinhole Defects in Cast Iron Casting by Surface Analysis, Homes et Fonderie, No.345, str.18-25, 2004**
- [35] **MONROE,R.: Porosity in Castings, AFS Transactions 2005, American Foundry Society, Paper 05-245(04), pp.1-28**
- [36] **ELBEL,T.: Reakce produktů reoxidace kovu se slévárenskou pískovou formou, Slévárenství č.4, str.163-168, Brno, 2005**
- [37] **GIRŠOVIČ,N.G. : Šedá litina II, SNTL, Praha 1955**
- [38] **PAVLÍK,I; CHRÁST,J: Pece k tavení, udržování a odlévání slitin železa a neželezných kovů, Slévárenství č. 3, str.133-140, Brno, 1994**
- [39] **VONDRÁK,V.: Bubnové otáčecí pece pro tavení slévárenských materiálů,**

Kompilační studie, Ostrava, 1994

- [40] **DOLIWA,H; HOFMAN,M: Porovnání tavení litiny v indukční kelímkové a plynové rotační bubnové peci, Slévárenství č.3, str.146-152, Brno, 1994**
- [41] **LEKACH,S.N.;BEZTUŽEV,N.I. : Vněpečnaja obrabotka vysokokačestvenych čugunov, Nauka i tehnika, Minsk, 1999**
- [42] **GIRŠOVIČ,N.G. : Šedá litina II, SNTL, Praha 1955**
- [43] **KULIKOV,I.C.: Raskislenie železa šeločnozemelnyimi metallami, Metally, č.6, str.9-17,1985**
- [44] **NEUMANN,F. : Metallurgische Schmelzföhrung und ihre Bedeutung für die Treffsicherheit der Gusseiseneigen – schaften beim induktiven Schmelzen, Brown, Boveri & CIE, Mannheim, 1972**

- [45] **KATZ,S: A new theory of Aluminum-Induced Gas Defects in Iron Castings and Potential Solutions, AFS Transactions 2006, American Foundry Society, Paper 06-072(08), pp.1-8**
- [46] **ELBEL,T.;HAMPL,J.:Vliv Al a Ti na strukturu a kvalitu odlitků z litiny s červíkovitým grafitem. Sborník vědeckých prací VŠB – Technické univerzity, Ostrava, řada hutnická, LII, č.2, 2009,s..41-48**
- [47] **SACE,G.,A.;NICOLA,W.,M.: The effect of Aluminum in the Cupola Charge, AFS Transactions 2007, American Foundry Society, Paper 07-056(08), pp.1-6**
- [48] **NEUMANN,F.: Theorien über das Impfen, Giesserei 83, str.11-15, Düsseldorf, 1996**
- [49] **NEUMANN,F.:Gußeisen–schmelztechnik–metallurgie–schmelzbehandlung, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1999**
- [51] **R DEVELOPMENT CORE TEAM: A language and environment for statistical computing, Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>., 2008**
- [51] **<http://cs.wikipedia.org>**
- [52] **PINHEIRO,J; BATES,D.; DEBROY,S; SARKAR,D. AND THE R CORE**

TEAM: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, R package version 3.1-89., (2008)

- [53] **FOX J.; ANDERSEN,R.; FIRTH,D.;FRIENDLY,M.: Displays for Linear and Generalized Linear Models. R package version, 1.0-12, <http://www.r-project.org>, <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/>, 2008**

Publikační činnost

- (1) Vondrák,V.; Dubová,M.: Výskyt strusky a bublinatosti u litinových odlitků, Komise pro tavení litin, Ostrava, červen 2002
- (2) Vondrák,V., Dubová,M.: Vedení tavby v indukčních kelímkových pecích za účelem snížení výskytu endogenních bublin v litinových odlitcích, Slévárenská ročenka 2003, Brno 2003
- (3) Dubová,M., Vondrák,V.: Eliminace endogenních bublin v litinových odlitcích vedením tavby v elektrických indukčních kelímkových pecích, Mezinárodní konference Spolupráce 2003, Polsko – Krakow, duben 2003
- (4) Dubová,M., Vondrák,V.: Výskyt strusky a bublinatosti u litinových odlitků II. – příklady z praxe, Komise pro tavení litin, Ostrava, květen 2003
- (5) Dubová,M., Vondrák,V.: Eliminace bodlin u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, Komise pro tavení litiny s kuličkovým grafitem, Praha, červenec 2003
- (6) Dubová,M., Vondrák,V.: Vedení tavby v EIKP za účelem snížení výskytu endogenních bublin v litinových odlitcích, VI. Mezinárodní metalurgické sympóziu, Slovensko - Rajecké Teplice, září 2003
- (7) Dubová,M., Vondrák,V.: Vedení tavby v elektrických indukčních kelímkových pecích za účelem snížení výskytu endogenních bublin v litinových odlitcích, konference Slévárenské pochody při výrobě odlitků, Plzeň, září/říjen 2003
- (8) Dubová,M.,Vondrák,V.: Einfluss des Sauerstoffes auf die Gusseiseneigenschaften in zerscholzen dem Stand, odborný seminář Den interních doktorandů, Ostrava, listopad 2003
- (9) Vondrák,V., Dubová,M.: Vedení tavby v indukčních kelímkových pecích za účelem snížení výskytu endogenních bublin v litinových odlitcích - II.část, Slévárenská ročenka 2004, Brno, 2004
- (10) Dubová,M.: Teze k disertační práci, Ostrava, březen 2003
- (11) Dubová,M., Vondrák,V.: Vedení tavby v rotačních plynových bubnových pecích za účelem snížení výskytu endogenních bublin v litinových odlitcích, Mezinárodní konference Spolupráce 2004, Slovenská republika - Tatranská Lomnica , duben 2004

- (12) Dubová, M., Vondrák, V.: Eliminace bodlin u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, Komise pro tavení litiny s kuličkovým grafitem, Praha, červen 2004

- (13) Dubová, M., Vondrák, V.: Výskyt strusky a bublinatosti u litinových odlitků III. – příklady z praxe, Komise pro tavení litin s lupínkovým grafitem, Ostrava, září 2004

- (14) Dubová, M.; Vondrák, V.: Aktivita kyslíku v roztavené litině a její vliv na fyzikálně-chemické vlastnosti litiny, Závěrečná zpráva projektu Fondu rozvoje vysokých škol číslo G1-1610, Ostrava 2004

- (15) Dubová, M.; Vondrák, V.: Eliminace endogenních bublin u litinových odlitků, Závěrečná zpráva projektu Fondu rozvoje vysokých škol číslo 286/2004, Ostrava 2005

- (16) Dubová, M., Vondrák, V.: Hodnotící zprávy pro provozy sléváren, ve kterých probíhal výzkum, Ostrava 2002-2004

Seznam příloh

- č.1 Výsledky měření a výpočtů ve slévárně S1
- č.2 Výsledky měření a výpočtů ve slévárně S2
- č.3 Výsledky měření a výpočtů ve slévárně S3
- č.4 Výsledky měření a výpočtů ve slévárně S4
- č.5 Výsledky měření a výpočtů ve slévárně S5
- č.6 Výsledky měření a výpočtů ve slévárně S6
- č.7-11 Slévárenské vady u technologie elektrických indukčních kelímkových pecí
- č.12-15 Slévárenské vady u technologie bubnových rotačních plynových pecí